

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

Modélisation et simulation d'une turbine éolienne à
vitesse variable

Devant le jury composé de :

- DJOKHRAB Ala eddine
- BEGGAT Fateh

Encadreur:

- LARGOT Soulef

Présenté par :

- LAIB Merouane
- AROUA Mohammed
- GUETROUN Aissa

2018-2019

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Modélisation et simulation d'une turbine éolienne à
vitesse variable**

Devant le jury composé de :

- DJOKHRAB Ala eddine
- BEGGAT Fateh

Encadreur:

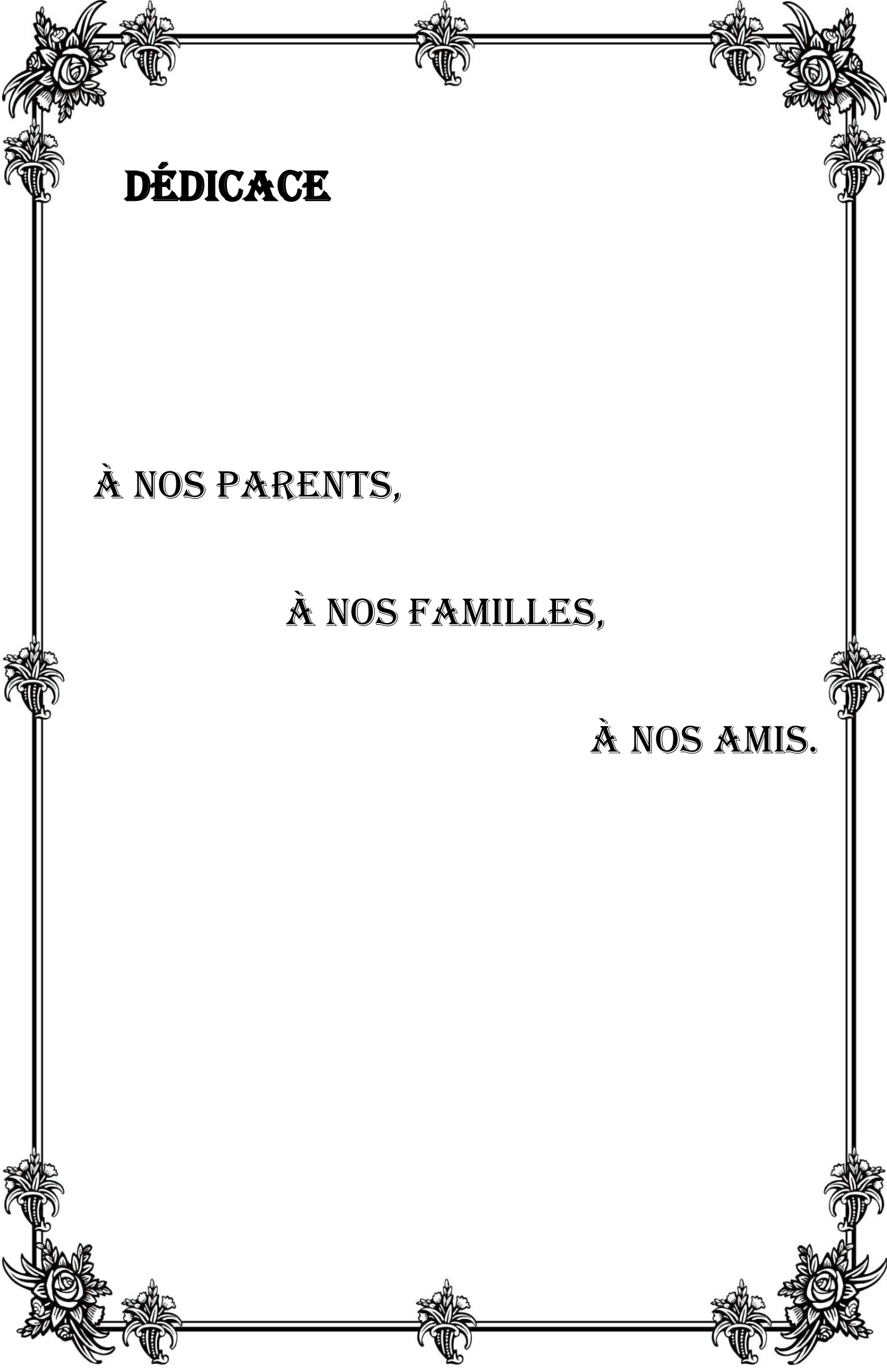
- LARGOT Soulef

Présenté par :

- LAIB Merouane
- AROUA Mohammed
- GUETROUN Aissa

2018-2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

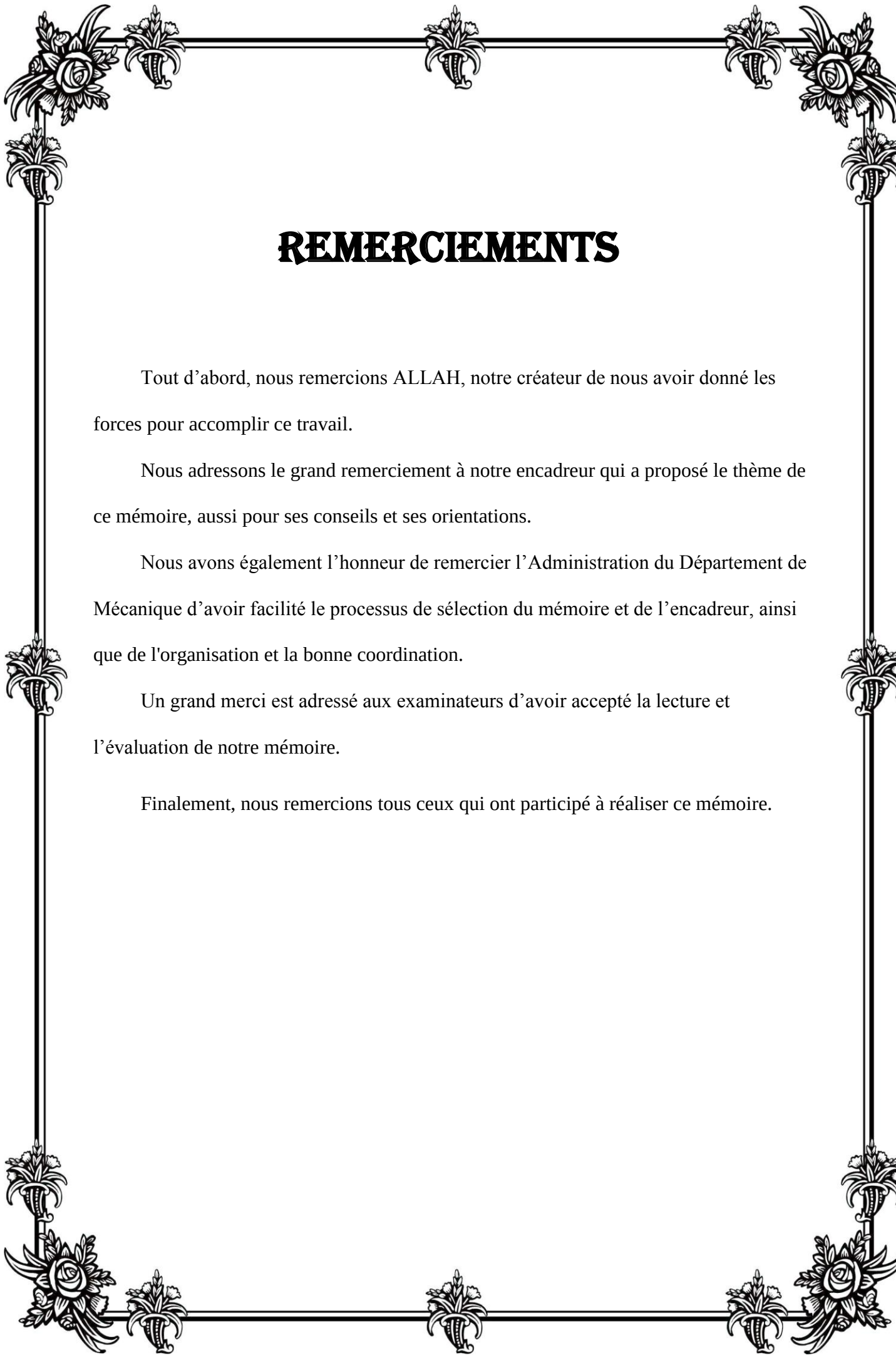


DÉDICACE

À NOS PARENTS,

À NOS FAMILLES,

À NOS AMIS.

A decorative border with floral motifs at the corners and midpoints of the top and bottom edges, enclosing the text.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations.

Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Mécanique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.

Un grand merci est adressé aux examinateurs d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire.

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire.

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce mémoire sont explicitées ci-dessous.

V_1	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
V_2	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
V_n	La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
V	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
S_1	La section amont du tube d'air.
S_2	La section aval du tube d'air.
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
F	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
P	Masse volumique de l'air 1,225 kg.m ⁻³
R	Rayon de la surface balayée par la turbine.
P_{aero}	La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
P_{mt}	La puissance disponible.
E_c	L'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'aérogénérateur.
C_p	Le coefficient de puissance.
β	L'angle de calage des pales.
C_{p_max}	Le coefficient de puissance maximal de la turbine.
v	La vitesse relative de l'éolienne.
λ_{opt}	La vitesse relative optimale de l'éolienne.

$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
Ω_{opt}	Vitesse de rotation optimale de l'arbre du générateur.
G	Gain du multiplicateur.
C_{mec}	Couple résistant issue du multiplicateur.
$C_{aéro}$	Couple aérodynamique de l'éolienne.
f_{ro}	Fréquence rotoriques.
g	glissement.
P_{mec}	Puissance mécanique disponible au niveau de l'arbre de la machine.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
$P[\theta_s]$	Matrice de PARK correspondant à l'enroulement statorique.
$P[\theta_r]$	Matrice de PARK correspondant au rotor.

P	Nombre de paires de pôles.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d .
θ_r	L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d .
Θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
ω_s	Pulsation électrique statorique.
ω_r	Pulsation de glissement ($\omega_s - \omega$).
ω	Vitesse angulaire de rotation.
Ω	Vitesse de rotation mécanique.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_{vis}	Couple des frottements visqueux.
R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
l_s	Inductance propre d'une phase statorique.
l_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.
M_{sr}	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe a_s coïncide avec l'axe a_r .
L_s	Inductance cyclique statorique.

L_r	Inductance cyclique rotorique.
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
P	Puissance active statorique.
Q	Puissance réactive statorique.
f_{mm}	Force magnéto motrice.
K_{ond}	Gain statique de l'onduleur.
V_{ref}	Tension de référence.
s	L'opérateur de LAPLACE.
J	Moment d'inertie totale.
Σ	Coefficient de dispersion.
T_s	Constante du temps statorique
T_r	Constante du temps rotorique
Z	Coefficient d'amortissement.
ω_0	Pulsation propre.
K_p, K_i	Gains du régulateur PI (proportionnelle - intégrale).
τ_i	Constante de temps du régulateur.
F	Coefficient de frottement.
J_{mach}	Moment d'inertie de la machine.
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine.
MADA	Machine asynchrone a double alimentation.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.

n	Indice du point neutre.
m	Indice de modulation.
r	Taux de modulation.
f_m	Fréquences de porteuse ou de modulation.
f_r	Fréquence du fondamentale.
A_r	Valeur crête de la tension de référence.
A_m	Valeur crête de la tension de commande.
F	Fréquence du réseau.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Production mondiale d'électricité renouvelable par région.....	02
Figure I.2: Système PV raccordé au réseau	03
Figure I.3: schéma de principe d'une usine biomasse.....	04
Figure I.4: schéma de principe d'une centrale gravitaire.....	04
Figure I.5: Géothermie haute énergie.....	05
Figure I.6: l' énergie marine.....	06
Figure I.7: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	07
Figure I.8 : principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	09
Figure II.9: éolienne a axe vertical	12
Figure II.10: éolienne a axe horizontal.....	13
Figure II.11:schéma de Description d'une éolienne.....	13
Figure II.12 Les composants de la nacelle d'une turbine éolienne.	14
Figure II.13 : Système éolien basé sur la machine synchrone à vitesse variable.	16
Figure II.14: Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau.....	17
Figure1 II.15 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.....	18
Figure II.16 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	19
Figure II.17: Cascade hypo synchrone.....	20
Figure II.18 : Machine asynchrone à double bobinage statorique.....	20
Figure II.19: Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.....	22

Figure II.20: Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.....	22
Figure II.21 : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.	24
Figure II.22: Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.	24
Figure II.23 : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.	25
Figure II.24: Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.	25
Figure II.25 : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais.....	26
Figure. III.26 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	32
Figure. III.27 : Coefficient de puissance.	33
Figure. III.28 : Coefficient de puissance en fonction de λ pour différents types d'éoliennes.....	33
Figure III.29 bilan des forces sur une pale.....	34
Figure III.30: Turbine éolienne.	35
Figure III.31 Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.	36
Figure III.32 Coefficient de puissance $C_p = f(\lambda, \beta)$	37
Figure III.33 schéma de la turbine éolienne	37
Figure III.34 Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.....	38
Figure III.35 résultats de simulation de la turbine	40
Figure IV.36 Modèle de PARK de la MADA	44
Figure IV.37 Représentation de la machine dans le repère biphasé	45

Figure IV.38 Principe de commande découplée pour la machine à CC à excitation séparée et la MADA.....	48
Figure IV.39 vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.....	49
Figure IV.40 Commande vectorielle par la méthode directe	53
Figure IV.41 schéma bloc de l'onduleur avec la commande MLI	54
Figure IV.42 résultats de simulation de la MADA sans convertisseur.....	55
Figure IV.43 schéma bloc de simulation	56
Figure IV.44 résultats de simulation de la MADA avec convertisseur	58

TABLE DES MATIER

TABLE DES MATIER

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Liste des symboles	iii
Liste des figures	iv
Table des matières	v
INTRODUCTION GENERALE	01
<u>Chapitre I: Généralités sur les énergies renouvelables</u>	
I.1 Introduction	02
I.2 Notions et principe sur les énergies renouvelables	02
I.3 Les différents types d'énergies renouvelables	03
I.3.1 L'énergie solaire	03
I.3.2 L'énergie de la biomasse	03
I.3.3 L'énergie hydraulique	04
I.3.4 L'énergie géothermique	05
I.3.5 L'énergie des mers ou énergie marine	05
I.3.6 L'énergie éolienne	06
I.3.6.1 Historique de l'énergie éolienne	06
I.3.6.2 le vent	07
I.3.6.3 Définition de l'énergie éolienne	07
I.4 chaine de conversion de l'énergie éolienne	08
I.5 principe de conversion de l'énergie éolienne	09

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	09
I.6.1 Avantages	09
I.6.2 Inconvénients	10

Chapitre II : Généralité sur la turbine éolienne et MADA

II.1 Introduction	11
II.2 Définition de la aérogénérateur	11
II.3 Les différent type des turbines éoliennes	12
II.3.1 Les éoliennes à axe vertical	12
II.3.2 Les éoliennes à axe horizontal	12
II.4 Description	13
II.5 Principaux composants d'une éolienne	14
II.5.1 Le mât	14
II.5.2 La nacelle	14
II.5.3 Le rotor	15
II.5.3.1 Les rotors à vitesse fixe	15
II.5.3.2 Les rotors à vitesse variable	15
II.6.1 Types de machines électriques	15
II.6.1.1 Générateur synchrone	15
II.6. 1.2 Générateur asynchrone	16
II.6.1.2.a Machine asynchrone à cage d'écureuil	17
II.6.1.2.b Machine asynchrone à double alimentation	18
II.7 Structure des machines asynchrones à double alimentation	19
II.7.1 Double alimentation par le stator	20

II.7.2 Double alimentation par le stator et le rotor	21
II.8 Avantages et inconvénients de la MADA	22
II.8.1 Avantages de la MADA	22
II.8.2 Inconvénients de la MADA	23
II.9 Classification	23
II.9.1 Machine à double alimentation simple	23
II.9.2 Machine à double alimentation en cascade	24
II.9.3 Machine à double alimentation cascade à un repère	24
II.9.4 Machine à double alimentation sans collecteur	25
II.9.5 Machine à double alimentation sans balais	25
II.10 Principe de fonctionnement de la MADA	26
II.11 Régimes de fonctionnement de la MADA	27
II.12 Mode de variation de vitesse	28
II.12.1 Action sur le glissement	28
II.12.2 Variation de la fréquence	28
II.12.3 Action sur le nombre de pôles	28
II.13 Conclusion	29

Chapitre III : modélisation et simulation de la turbine éolienne

III.1. Introduction	30
III.2 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	30
III.2.1 Le coefficient de puissance	31
III.2.2 Loi de BETZ	31
III.3 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	34

III. 3.1 Bilan des forces sur une pale	34
III.4 Modélisation de la turbine éolienne	34
III.4.1 Modèle de la turbine	35
III.4.2 Modèle des pales	35
III.4.3 Modèle du multiplicateur de vitesse	37
III.4.4 Modèle de l'arbre mécanique	38
III.5 Simulation de la turbine éolienne	38
III.5.1 Schéma bloc de la turbine	38
III.5.2 Résultats de la simulation	39
III.6 Conclusion	41

Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MADA

IV.1 Introduction	42
IV.2 Modèle de la MADA	42
IV.2.1 Hypothèses	42
IV.2.2 Equations générales de la MADA	43
IV.3 Modèle biphasé de la MADA	45
IV.3.1 Equations des tensions	45
IV.3.2 Equation des courants	46
IV.3.3 Equation des flux	46
IV.4 Choix du référentiel	46
IV.4.1 Référentiel lié au stator	46
IV.4.2 Référentiel lié au rotor	47
IV.4.3 Référentiel lié au champ tournant	47

IV.5 Stratégie de command de la MADA	48
IV.6 Commande vectorielle de la MADA	49
IV.6.1 Relations entre les courants statoriques et rotoriques	50
IV.6.2 Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone	50
IV.6.3. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques	51
IV.7 Simulation et commande	52
IV.7.1 Simulation de la commande vectorielle	52
IV.7.2 Simulation de la MADA	53
IV.7.2.1 Bloc de l'onduleur avec la commande MLI	54
IV.7.2.2 Les résultats de la simulation	54
IV.7.3 Simulation de l'association onduleur MADA	56
IV.7.3.1 Bloc de l'association Onduleur-MADA	56
IV.7.3.2 Le résultats de la simulation	57
IV.8 Conclusion	59
Conclusion générale	60
ANNEXE (A)	
Référence bibliographies	

Introduction générale

Dans le monde, la production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles et de combustible d'origine nucléaire. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet d'avoir de faibles coûts de production mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre. La production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO₂ .[1]

C'est pour cela tous les pays du monde cherche ou bien ils orientent leurs perspectives aux énergies renouvelable (propre, durable, etc ...).

L'énergie éolienne est l'une des solutions proposées en fonction de son existence, elle dure réellement par rapport à l'axe de la vie humaine.

L'énergie éolienne devrait connaître une forte croissance dans de nombreuses régions, mais cette énergie très volatile, en raison de fortes variations de la vitesse du vent, peut affecter de manière significative la qualité de la tension et du courant du réseau.

L'Object de ce mémoire est : Ce travail concerne la modélisation d'une chaîne éolienne utilisant un aérogénérateur à axe horizontal à vitesse variable relié à une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Cette modélisation a été développé dans l'environnement Matlab/Simulink afin d'analyser les performances du système éolien

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

- ❖ Dans le premier chapitre, nous avons présenterons les concepts et principes des énergies renouvelables, ainsi que des généralités dans le domaine de l'énergie éolienne, le principe de son travail, ses inconvénients et ses avantages.
- ❖ Le second chapitre de ce mémoire les généralités sur les systèmes éoliens sera Présenté et la machine asynchrone double d'alimentation .
- ❖ Le troisième chapitre : nous allons modéliser et simuler de la turbine éolienne.
- ❖ le quatrième et le dernier chapitre : nous allons modéliser et simuler de la MADA.

Et on finalisera notre (mémoire) par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralité sur Les énergies renouvelables

I.1 Introduction:

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées.

I.2 Notions et principe sur les énergies renouvelables :

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

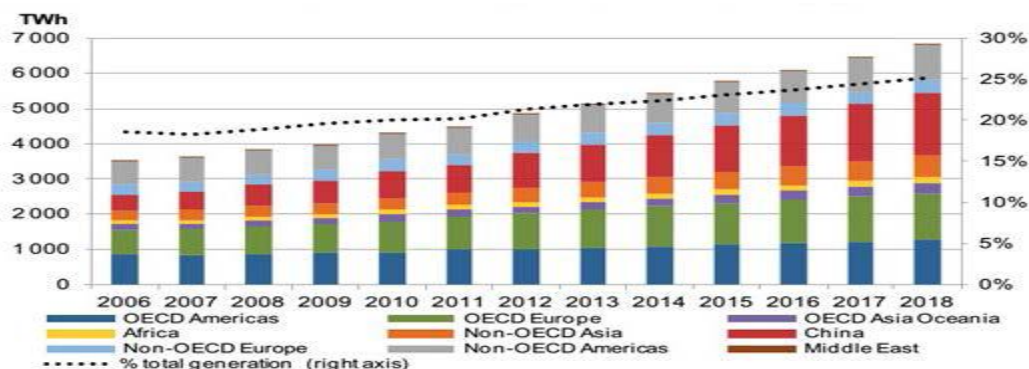


Figure I.1 Production mondiale d'électricité renouvelable par région [2]

I.3 Les différents types d'énergies renouvelables :

I.3.1 L'énergie solaire :

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement.

C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique (voir photo à droite), des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires (voir photo à gauche).

Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire.

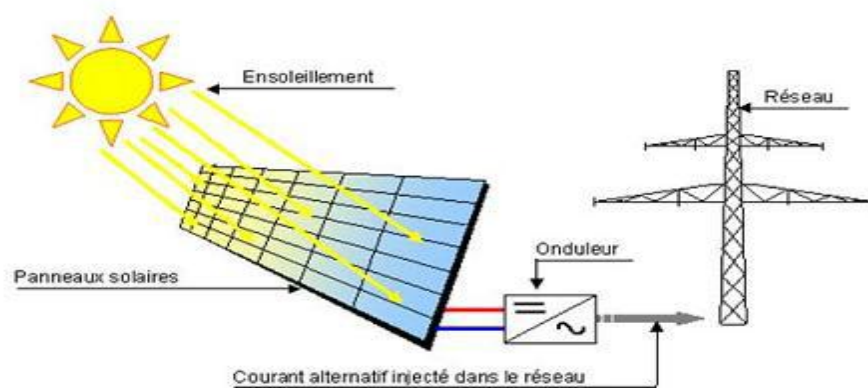


Figure I.2: Système PV raccordé au réseau. [3]

I.3.2 L'énergie de la biomasse :

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante,

grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie¹), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.

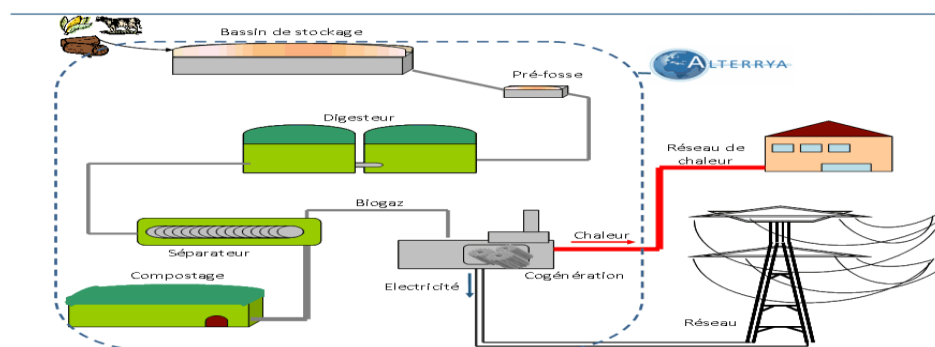


Figure I.3: schéma de principe d'une usine biomasse

I.3.3 L'énergie hydraulique :

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.

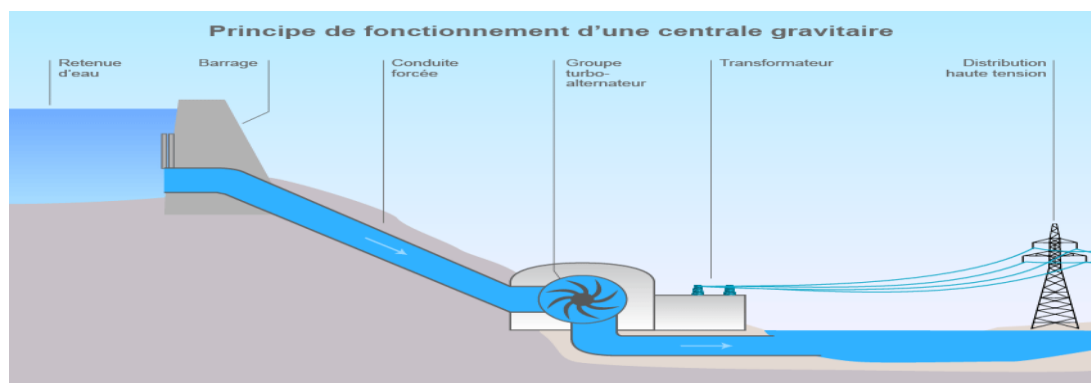


Figure I.4: schéma de principe d'une centrale gravitaire

I.3.4 L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude.

La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple.

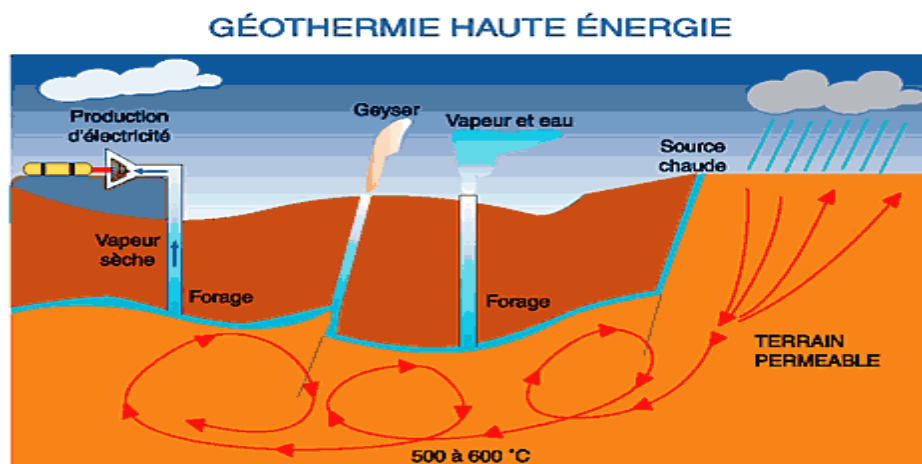


Figure I.5: Géothermie haute énergie

I.3.5 L'énergie des mers ou énergie marine :

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable.

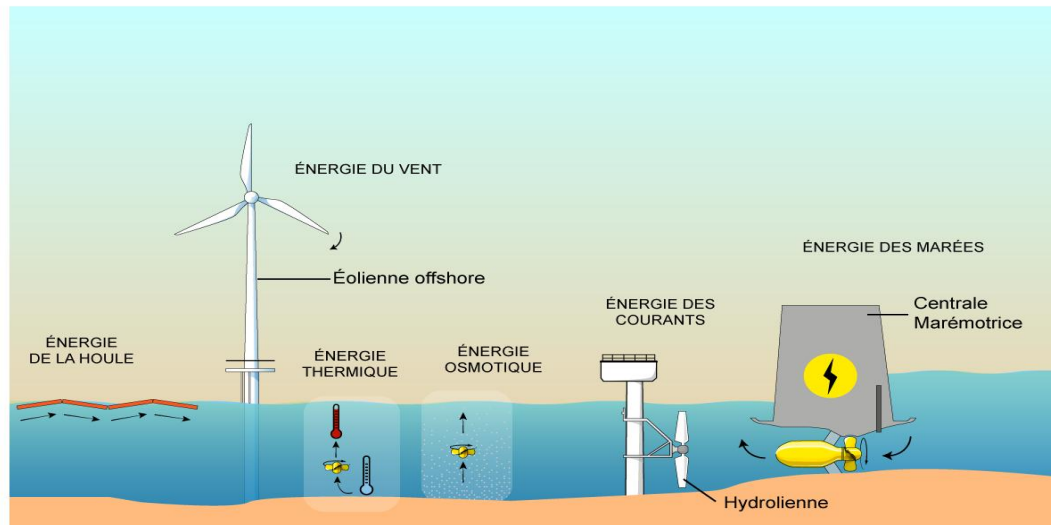
ÉNERGIES MARINES RENOUVELABLES

Figure I.6: l' énergie marine

I.3.6 L'énergie éolienne :

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.

I.3.6.1 Historique de l'énergie éolienne :

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable, [4].

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [08].

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle [4].

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [6].

Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [7].

I.3.6.2 le vent :

Cette est une masse d'air en mouvement dont le déplacement est provoqué par des différences de températures entre différents points de la Terre.

I.3.6.3 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et sur tout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences [5].

L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre

la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produit étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

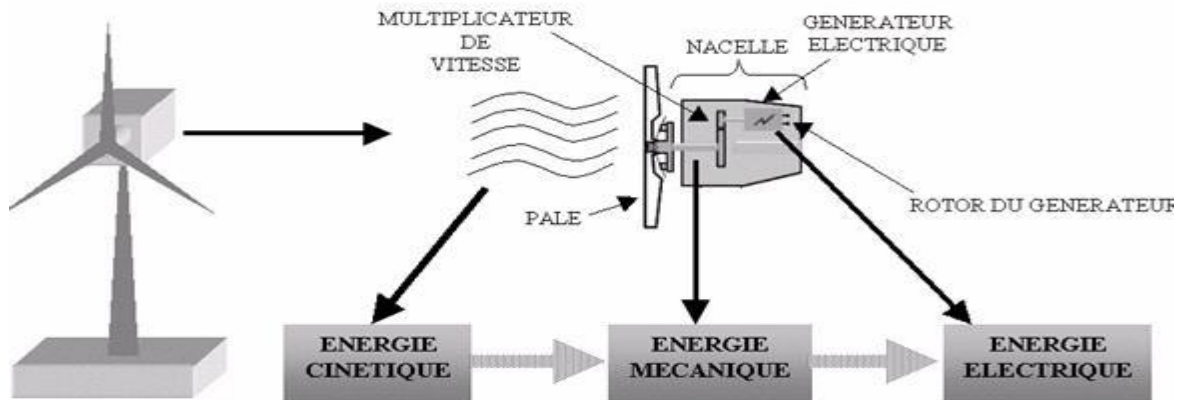


Figure I.7: Conversion de l'énergie cinétique du vent [9]

I.4 chaîne de conversion de l'énergie éolienne :

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique.

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes:

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes.

I.5 principe de conversion de l'énergie éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

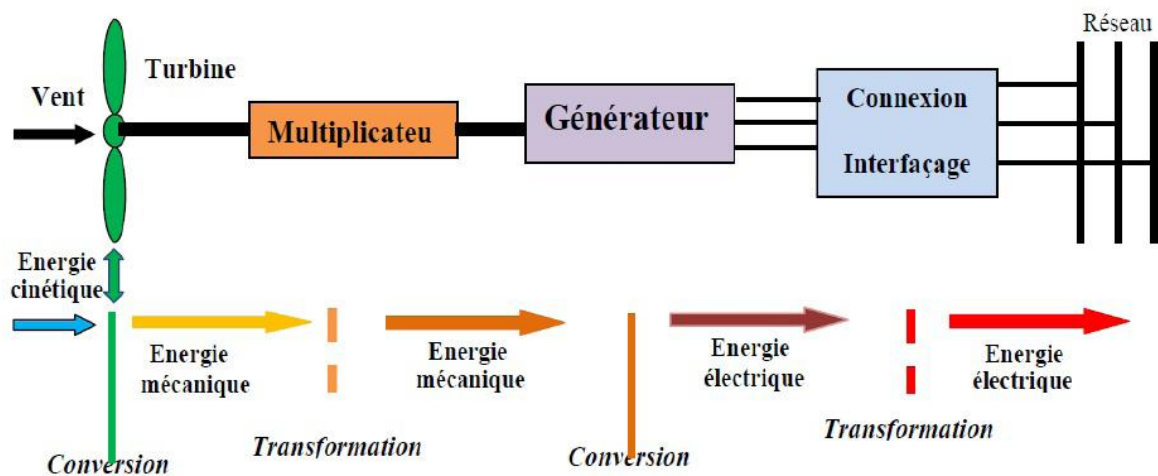


Figure I.8 : principe de la conversion de l'énergie éolienne

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.6.1 Avantages :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [10].

Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂ [11].

✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [12].

✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [12].

✓ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [9].

✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [12].

✓ Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [12].

I.6.2 Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

✓ L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif [12].

✓ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [13].

✓ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.

✓ La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.

✓ La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [12].

✓ Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes

✓ utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [12].

Chapitre II : Généralités sur la turbine éolienne et MADA

II.1 Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple /vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.

II.2 Définition de l' aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [9].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments dont la nacelle, le mât, les pales et le multiplicateur, doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative plus au moins stable à l'énergie nucléaire et d'autres

d'origine fossile. Sans pour autant, prétendre à les remplacer de nos jours si nous prenons en compte l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite qui est largement plus faible.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer. Ces dernières donnent naissance aux fermes éoliennes offshore, où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

II.3 Les différents types des turbines éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut diviser les éoliennes en deux grandes familles[15],[9] :

- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes à axe horizontal

II.3.1 Les éoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne (figure II.9) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [16].

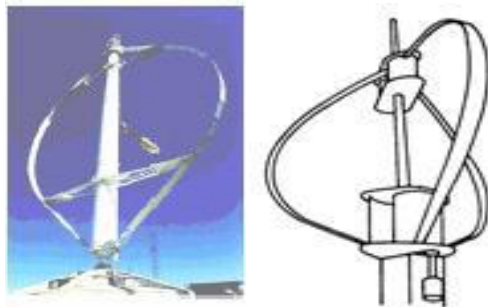


Figure II.9: éolienne à axe vertical [17]

II.3.2 Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal (figure II.10) beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un

rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [17] .

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi- pales. ceci pour plusieurs raisons :

- Elles sont légères et donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.

Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent

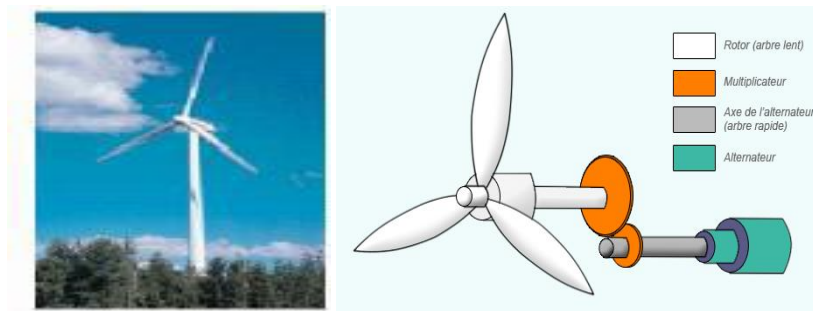


Figure II.10: éolienne a axe horizontal [17]

II.4 Description:

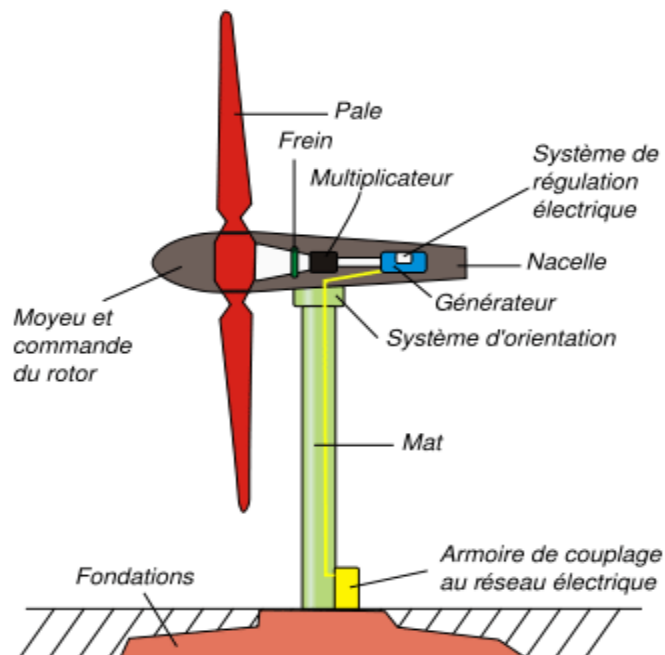


Figure II.11:schéma de Description d'une éolienne [9]

II.5 Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure II.12).

- ❖ le mât
- ❖ la nacelle
- ❖ le rotor

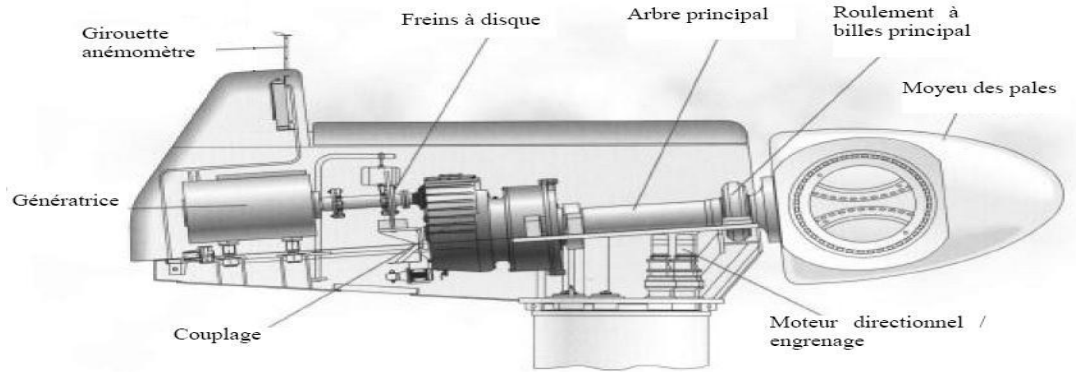


Figure II.12 Les composants de la nacelle d'une turbine éolienne.

II.5.1 Le mât :

généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. [9]

II.5.2 La nacelle :

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique (figure II.11). Elle comprend les éléments suivants :

- Arbre.
- Multiplicateur.
- Roulements.
- Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
- Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

II.5.3 Le rotor :

formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées ; actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. [18]

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

II.5.3.1 Les rotors à vitesse fixe :

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût [9].

II.5.3.2 Les rotors à vitesse variable :

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [9].

II.6 Types de machines électriques :

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

II.6.1 Générateur synchrone :

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateur à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure II.13).

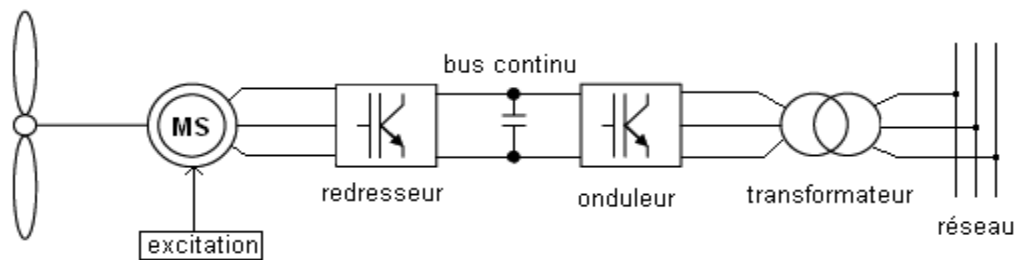


Figure II.13 : Système éolien basé sur la machine synchrone à vitesse variable.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance [19].

II.6. 2 Générateur asynchrone :

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

II.6.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important) , la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct .

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (II.14), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

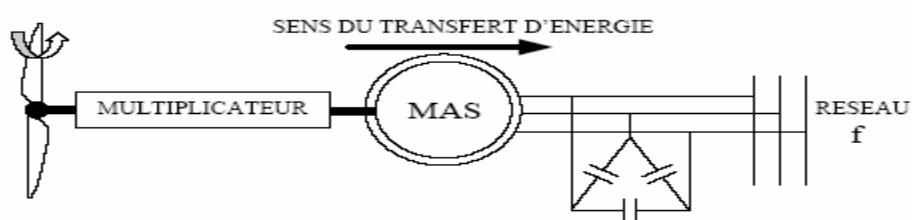


Figure II.14: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau[20]

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (figure II.15).

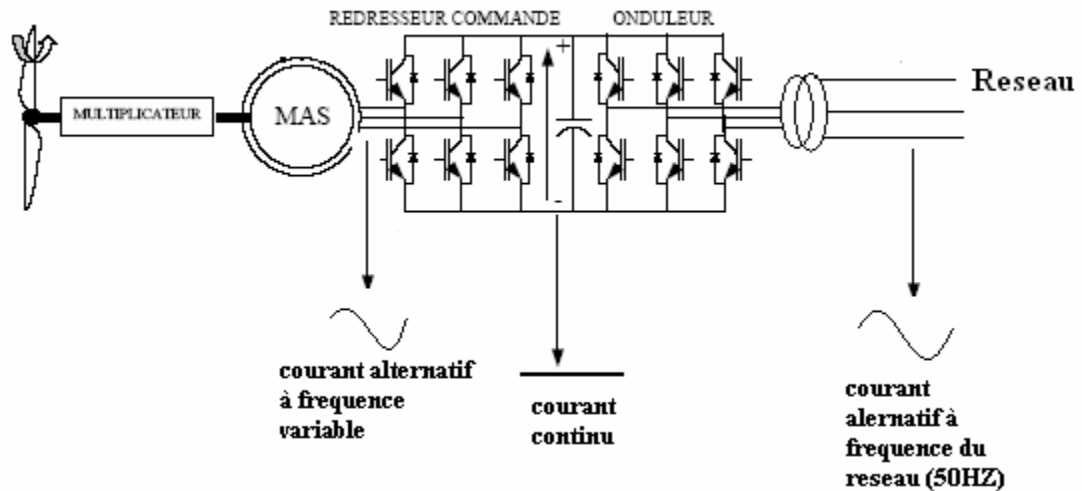


Figure1 II.15 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance[20]

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée [20].

II.6.2.2 Machine asynchrone à double alimentation :

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable [21].

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur ; A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [22] [23].

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [20].

II.7 Structure des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [24].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure II.16)

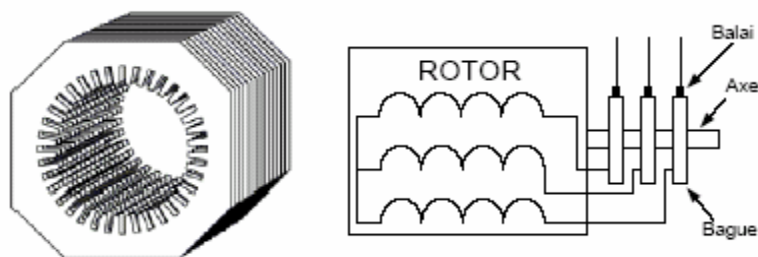


Figure II.16 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [20]

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à

cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone (Figure II.17) [1].

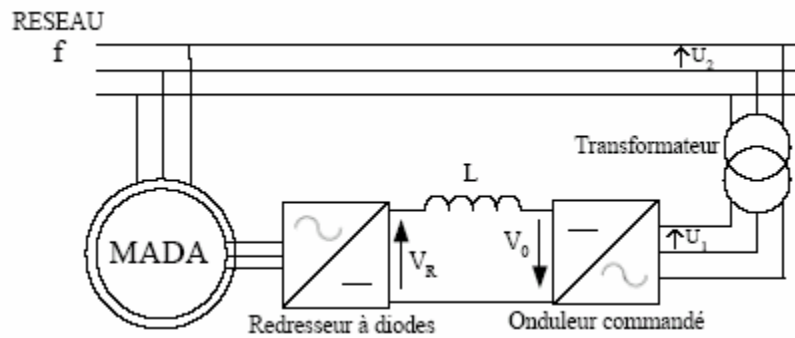


Figure II.17: Cascade hypo synchrone

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

II.7.1 Double alimentation par le stator :

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure II.18)

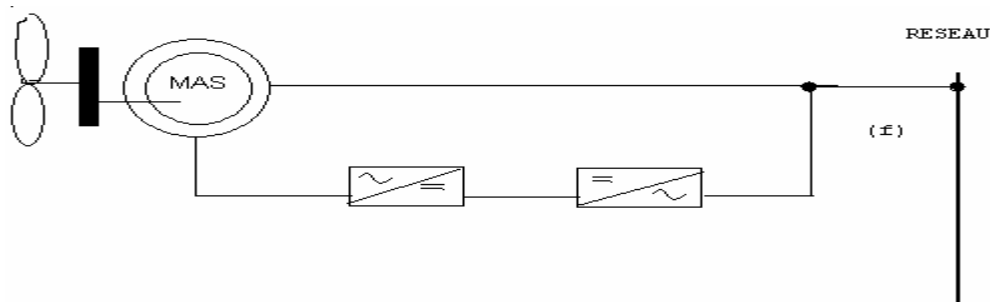


Figure II.18 : Machine asynchrone à double bobinage statorique

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée.

En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage.

L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit.

Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice.

En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu .

Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive.

Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

II.7.2 Double alimentation par le stator et le rotor :

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (figure II.19).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance p est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1 - g) p$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gp sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g \cdot f$.

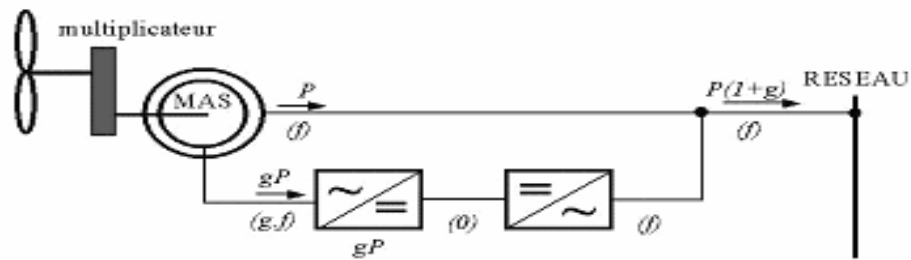


Figure II.19: Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)p$; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure II.20).

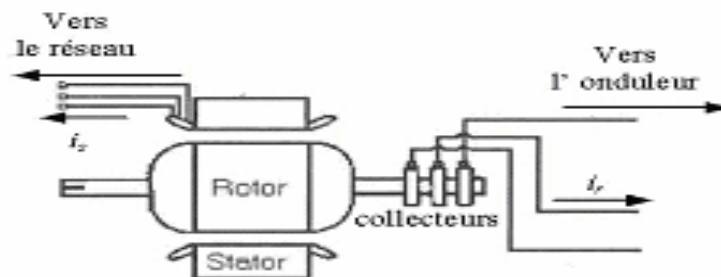


Figure II.20: Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

II.8 Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

II.8.1 Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons : [23,26]

- L'accessibilité au rotor et au stator rend la mesure des courants possible ce qui offre une grande flexibilité et précision pour contrôle de flux et du couple électromagnétique
- Elle offre plusieurs possibilités de reconfiguration grâce à sa double alimentation ce qui permet à cette dernière de trouver un large domaine d'application.
- Fonctionnement possible à couple constant au delà de la vitesse nominale ;

- Le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine pour une vitesse de fonctionnement autour de celle de synchronisme dans ce cas les pertes des interrupteurs à semi-conducteur sont faibles et par conséquent un rendement élevé du système de conversion ;
- Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne.

II.8.2 Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants : [27,28].

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte.

II.9 Classification :

Dans la littérature du domaine des machines asynchrones à double alimentation, on trouvera la classification suivante [29], [30], [31] :

II.9.1 Machine à double alimentation simple :

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine).

La figure (II.21) illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être composé par un redresseur et un

onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cycloconvertisseur (conversion directe)[29], [30],[31].

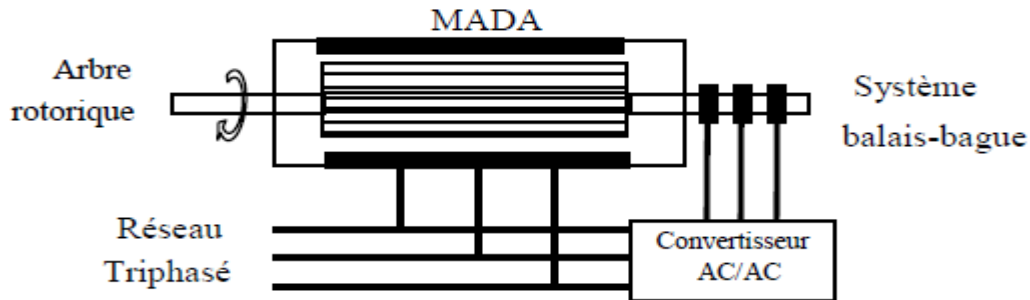


Figure II.21 : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

II.9.2 Machine à double alimentation en cascade :

Cette machine est constituée de deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement , (Cascaded Doubly Fed Induction Machine).

La figure (II.22) présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation .Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées [28].

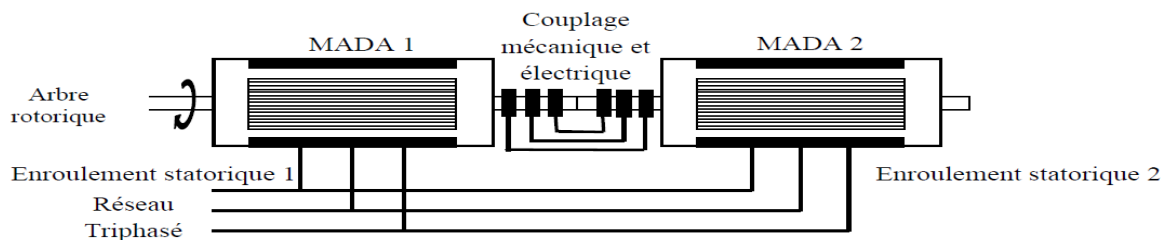


Figure II.22: Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.

I.9.3 Machine à double alimentation cascade à un repère :

La machine à double alimentation cascade à un repère consiste de deux machines asynchrones à cage connectés mécaniquement, (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (II.23) présente le schéma de principe, tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif, [28].

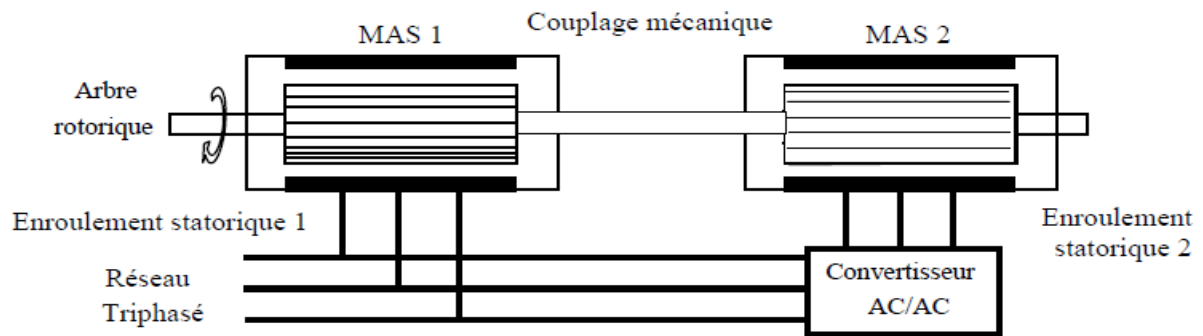


Figure II.23 : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

II.9.4 Machine à double alimentation sans collecteur :

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC, la figure (II.24).

Ce type de machine consiste de deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôles, [25].

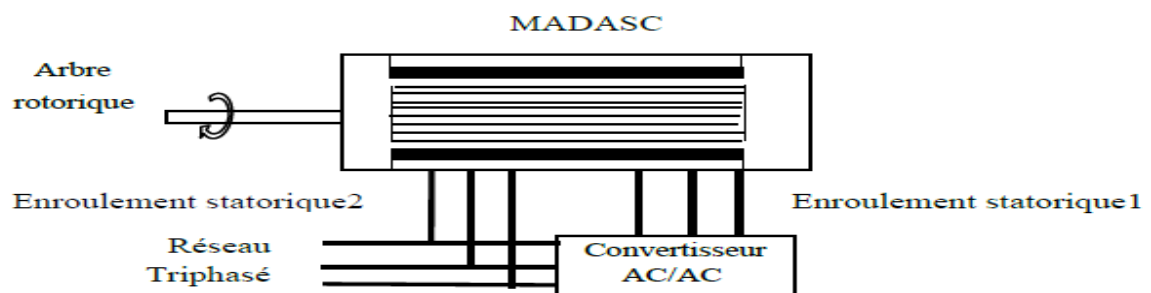


Figure II.24: Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.

II.9.5 Machine à double alimentation sans balais :

C'est une machine asynchrone avec deux enroulements ayant des nombres de paires de pôles différents logés dans la même armature du stator.

L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC (Figure II.25). Le rotor de cette machine possède un nombre de paires de pôles égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques ; [32].

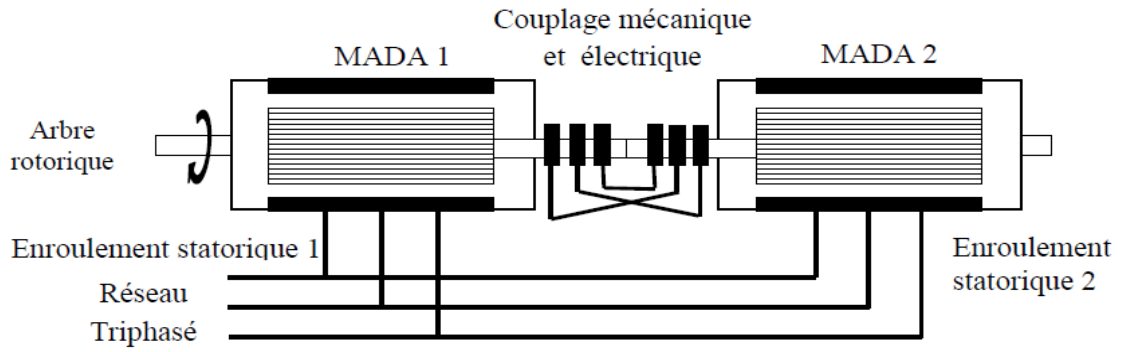


Figure II.25 : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais

Parmi les types les plus connus de machines à double alimentation sans balais, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance .

II.10 Principe de fonctionnement de la MADA :

La machine étudiée est machine asynchrone à double alimentation triphasée, équilibrée et a rotor bobiné, dont la source d'excitation est disposée au niveau du rotor.

Les bobines du rotor sont connectées au réseau, un flux magnétique tournant apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans la bobine statorique et rotorique et donc du courant statique pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des F.E.M dans les bobinages du rotor, le rapport entre les F.E.M créée au rotor et stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{\frac{N_r}{N_s} (\Omega_s - \Omega_r)}{\Omega_s} \quad (II.1)$$

N_r et N_s sont respectivement le nombre de spire de bobinage du rotor et stator

ω_s , ω_r sont respectivement les pulsation de synchronisme et mécanique de la machine

En définissant le glissement par :

$$g = \Omega_s - \frac{\Omega_r}{\Omega_s} \quad (II.2)$$

Le courant dans le stator et le rotor est défini comme dans le cas d'un transformateur parfait:

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (II.3)$$

Donc le rapport entre S_r au rotor et la puissance S_s au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{I_r}{I_s} \times \frac{E_r}{E_s} = g \quad (II.4)$$

L'équation (II.4) montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator étant supposée constant, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement, [33].

II.11 Régimes de fonctionnement de la MADA :

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit :

➤ Stationnaire ($g=1$)

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s ; par conséquent, le rotor est le siège d'une F.E.M induite avec une fréquence f_r identique avec f_s . Dans cette condition, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

➤ Hypo synchrone ($0 < g < 1$)

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.

➤ Synchrone ($g=0$)

Au point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.

On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête).

➤ **Hyper synchrone ($g < 0$)**

Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor,[34].

II.12 Mode de variation de vitesse :

L'examen de la formule de la vitesse donné par :

$$\Omega = 2 \times \frac{\pi}{p} \times F_s \times (1 - g) \quad (II.5)$$

fait sortir trois modes de variations :

II.12.1 Action sur le glissement :

Pour régler la vitesse, lorsqu'on utilise ce principe, on place entre le réseau et le moteur un gradateur pour chacune des phases. On fait varier la vitesse par action sur l'angle de passage des courants durant chaque alternance. Ce mode affecte directement le rendement

$$\eta = (1 - g) \quad (II.6)$$

Techniquement on réalise ce type par action sur la tension d'alimentation pour le moteur à rotor à cage et avec une résistance rotorique pour le moteur à rotor bobiné.

II.12.2 Variation de la fréquence :

Pour faire varier la vitesse dans de bonnes conditions, il faut faire varier sa fréquence d'alimentation en utilisant des convertisseurs (onduleur MLI ou plein onde-cyclo convertisseur).

II.12.3 Action sur le nombre de pôles :

C'est un mode constructif par action sur le nombre de pôles, cette technique de bobinage consistant à changer la polarité de la machine par un changement des sens de

courant. La vitesse Ω varie du simple au double et inversement ce qui implique une variation discontinue [35].

II.13 Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons rappelé une généralités sur la turbine éolienne et les différents composants des éoliennes et leurs types ont été présentés et expliqués , ainsi qu'une présentation des différents types de machines électriques pouvant être couplées à des éoliennes, avec différentes classifications et principe de fonctionnement MADA , ses inconvénients et ses avantages .

Chapitre III :

modélisation et simulation de la turbine éolienne

III.1 Introduction :

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent. Et leurs structures sont de plus en plus performantes. Nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Différentes techniques de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevées.

Des modèles analytiques de la turbine éolienne seront réalisées et comparés en utilisant différentes méthodes d'optimisation de puissance.

III.2 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur.

En effet, si nous considérons une masse d'air m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse E_c est [36] :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (III.1)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être entièrement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent. La puissance instantanée fournie serait :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (III.2)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air .

La puissance qui peut être fourni par une éolienne est fonction de trois principaux paramètres : l'énergie éolienne disponible, la courbe de puissance de la machine ainsi que la capacité de l'aérogénérateur à réagir aux fluctuations du vent.

III.2.1 Le coefficient de puissance :

Parce que la vitesse en aval du dispositif de récupération n'est jamais nulle, la puissance ne peut être captée en sa totalité [37], le dispositif de conversion extrait une partie seulement P_m de la puissance incidente P_v .

Ainsi, la puissance P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime comme suit :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p(\lambda) \quad (III.3)$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable inférieure à 1, dit aussi rendement. Ce dernier est propre à chaque éolienne qui lie la puissance fournit par l'éolienne P_m est la puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure par la relation suivante. :

$$C_p = P_m / P_v \quad (III.4)$$

III.2.2 Loi de BETZ :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (III.26) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho \times S(V_1 + V_2)}{2} \quad (III.5)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (III.6)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (III.1) :

$$P_m = \frac{\rho s (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (III.7)$$

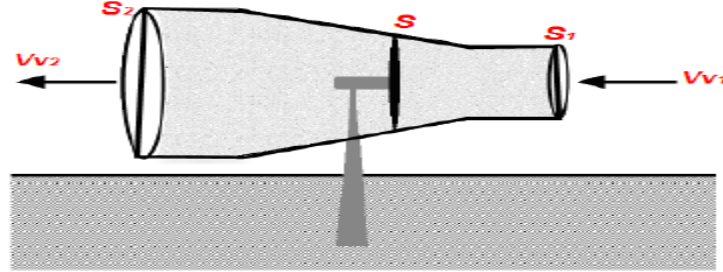


Figure. III.26 : Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho s V_1^2}{2} \quad (III.8)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{4} \quad (III.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure III.27), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance CP présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [38].

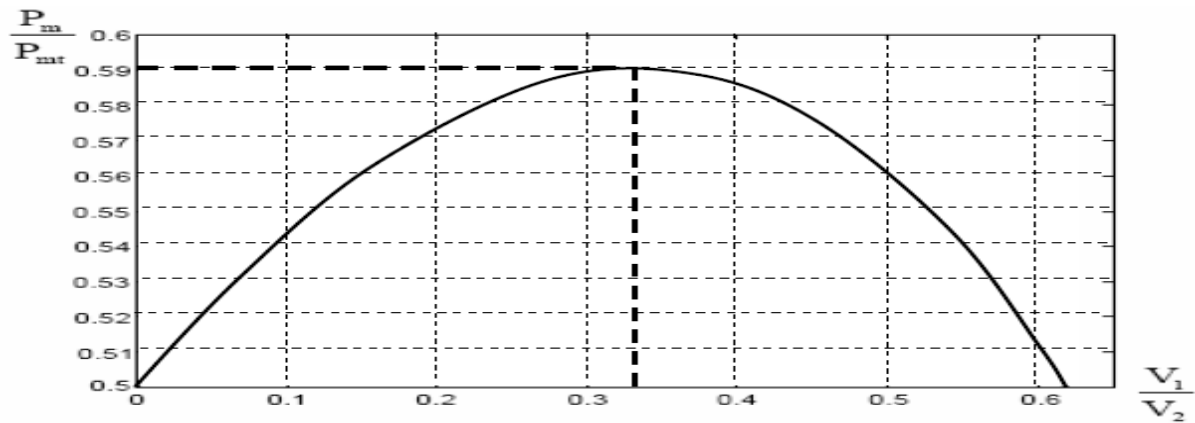


Figure. III.27 : Coefficient de puissance.

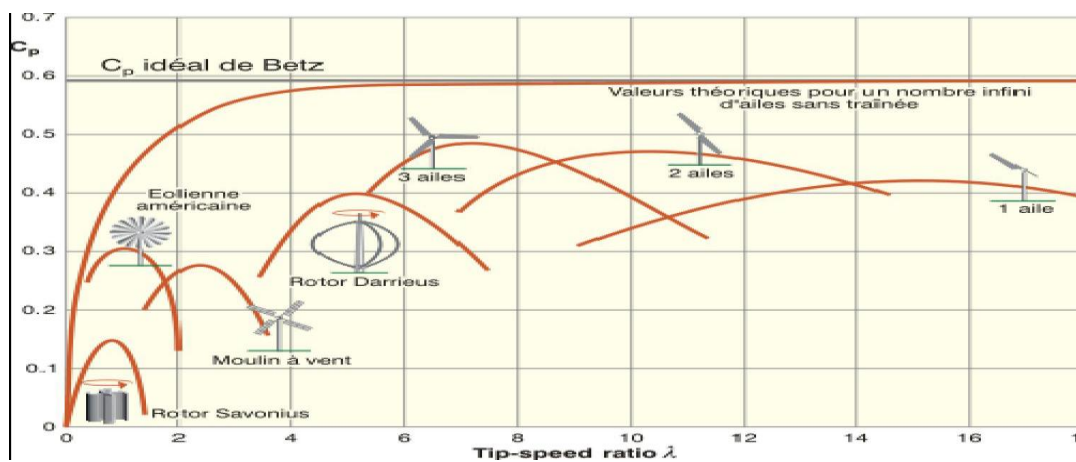


Figure. III.28 : Coefficient de puissance en fonction de λ pour différents types d'éoliennes[39]

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure III.28) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

III.3 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne :

III.3.1 Bilan des forces sur une pale :[41]

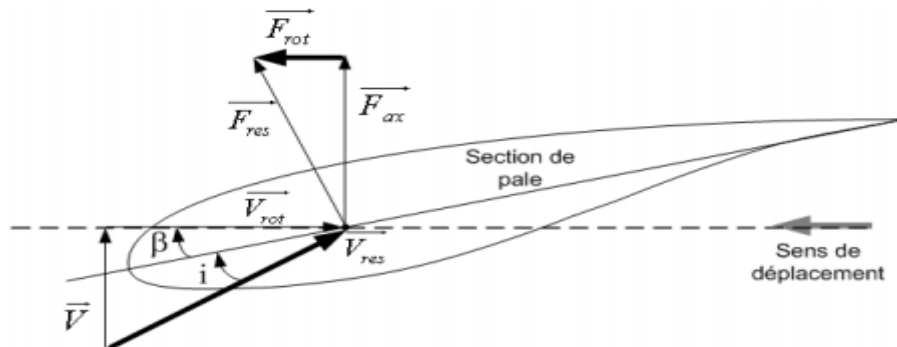


Figure III.29 bilan des forces sur une pale

La Figure (III.29) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représenté par le vecteur $\vec{V}$. Le vecteur $\vec{V}_{rot}$ représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée $\vec{V}_{res}$. L'action du vent sur la pale produit une force $\vec{F}_{res}$ qui se décompose en une poussée axiale $\vec{F}_{ax}$ directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation $\vec{F}_{rot}$ qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

III.4 Modélisation de la turbine éolienne :

III.4.1 Modèle de la turbine :

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure III.30).

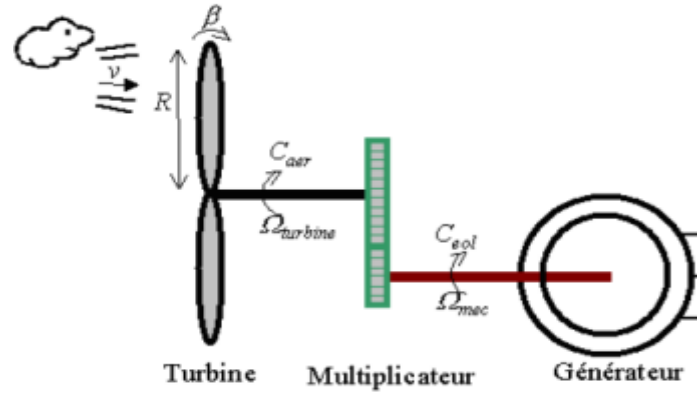


Figure III.30: Turbine éolienne.

III.4.2 Modèle des pales :

La puissance cinétique du vent est donnée par [40]:

$$P_v = \frac{\rho \times S \times v^3}{2} \quad (III. 10)$$

avec :

- ρ : densité de l'air (approxim. 1,22 kg / m³ à la pression atmosphérique à 15°C)
- S : surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi R^2$ (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- v : vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit : [42]

$$P_{aero} = c_p(\lambda, \beta) P_v = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho s v^3}{2} \quad (III. 11)$$

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent : [43]

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{v} \quad (III. 12)$$

$\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine.

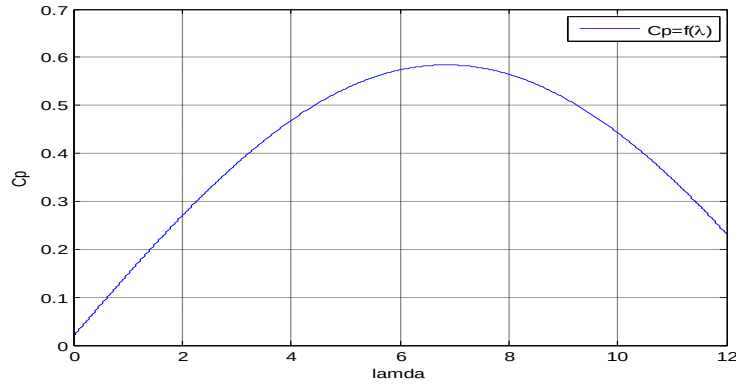


Figure III.31 Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine.

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine.

L'expression du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage des pales β est :

$$C_p(\lambda_i, \beta_i) = (0.44 - 0.0167\beta_i) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta_i}\right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot \beta_i \quad (III.13)$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique $C_{aéro}$ disponible sur l'arbre de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{2 \cdot \Omega_{turbine}} \quad (III.14)$$

La simulation par le logiciel MATLAB a donné :

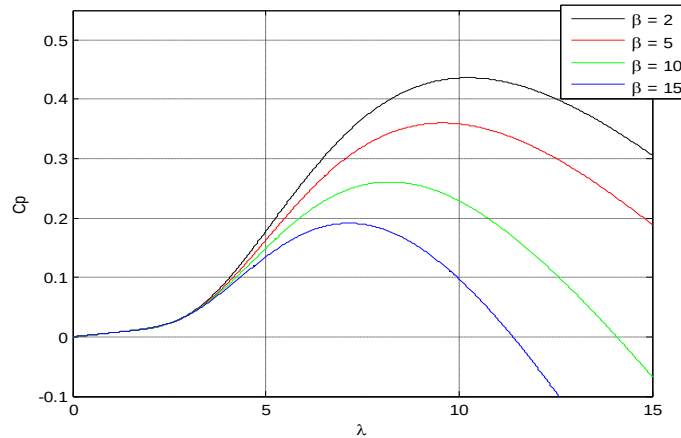


Figure III.32 Coefficient de puissance $C_p = f(\lambda, \beta)$.

➤ **Interprétation de résultat :**

Nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne, Donc la valeur optimale $C_p = 0.45$ est pour $\beta = 2$.

III.4.3 Modélisation du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure III.33). Il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_{mec} = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (III.15)$$

$$\Omega_{mec} = \Omega_{turbine} \cdot G \quad (III.16)$$

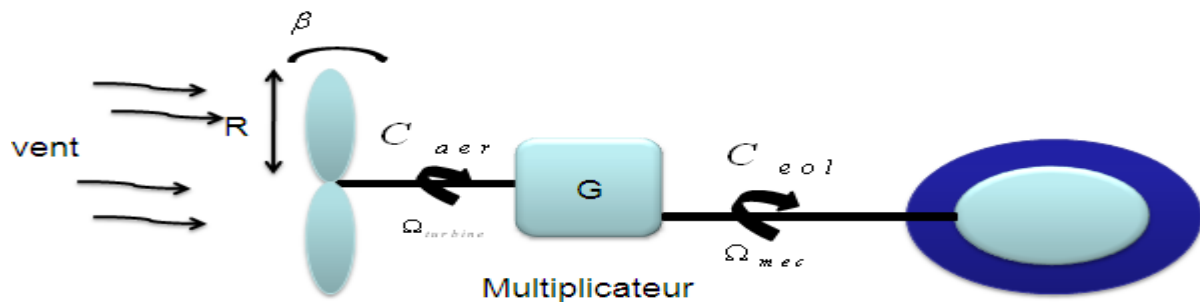


Figure III.33 schéma de la turbine éolienne

III.4.4. Modèle de l'arbre mécanique :

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{mach} \quad (III.17)$$

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couple} = C_{mec} - C_{em} - C_{vis} \quad (III.18)$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons:

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (III.19)$$

III.5 Simulation de la turbine éolienne :

III.5.1 Schéma bloc de la turbine :

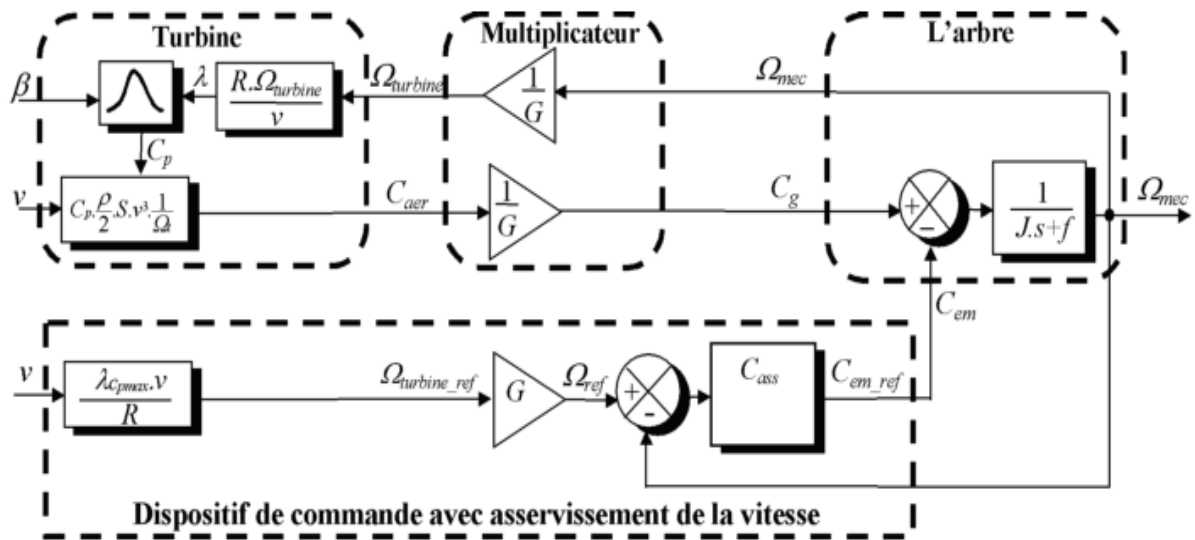


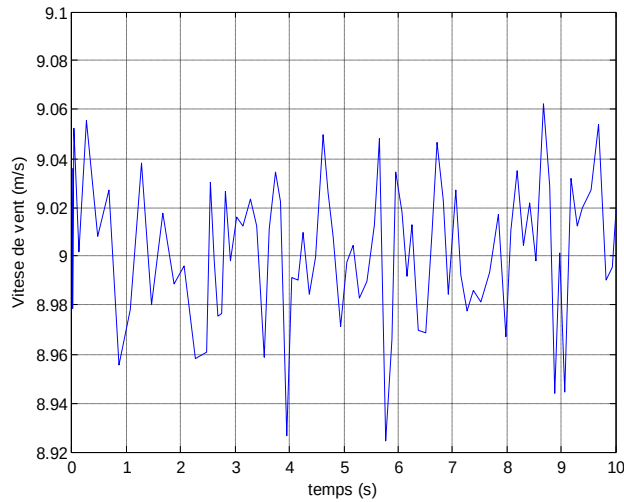
Figure III.34 Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

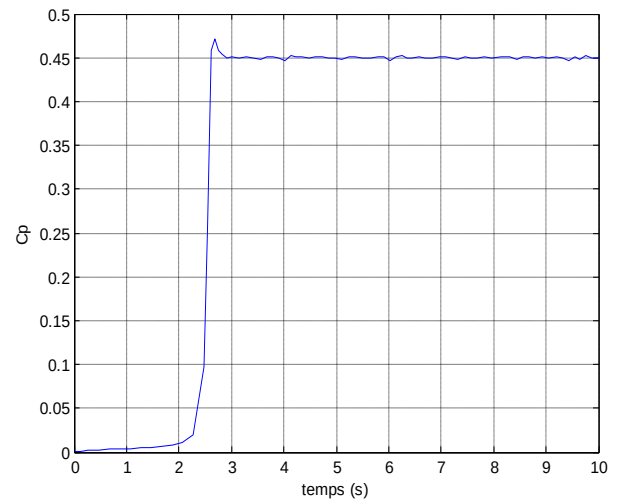
Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation (Figure III.34).

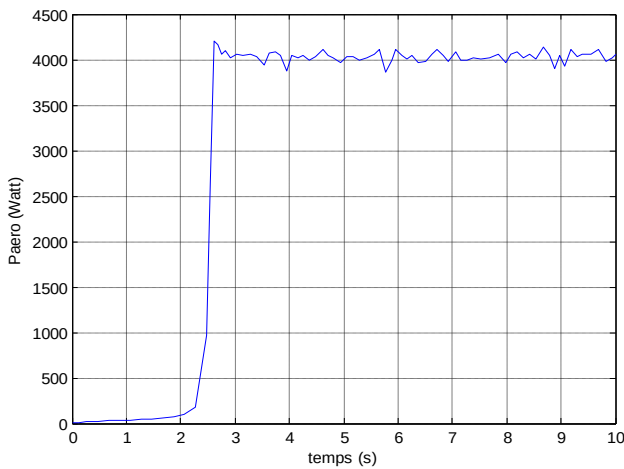
III.5.2 Résultats de simulation :



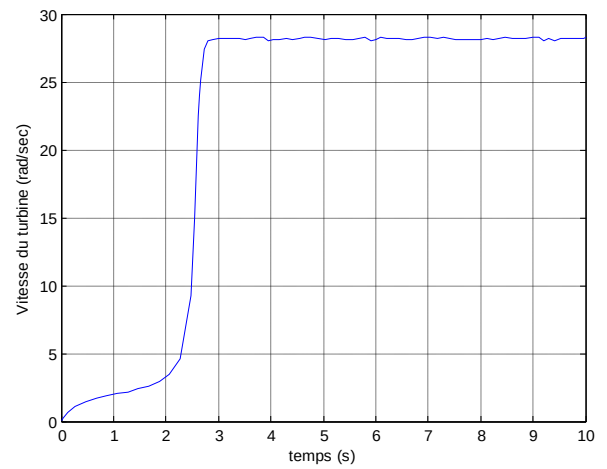
a) Vitesse de vent variable



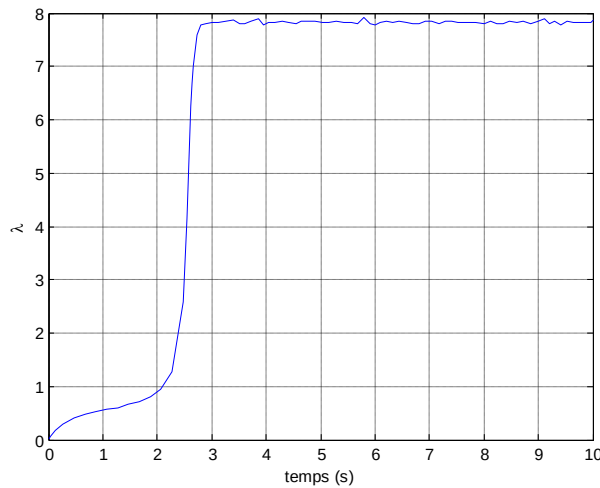
b) Evolution de C_p à vitesse variable.



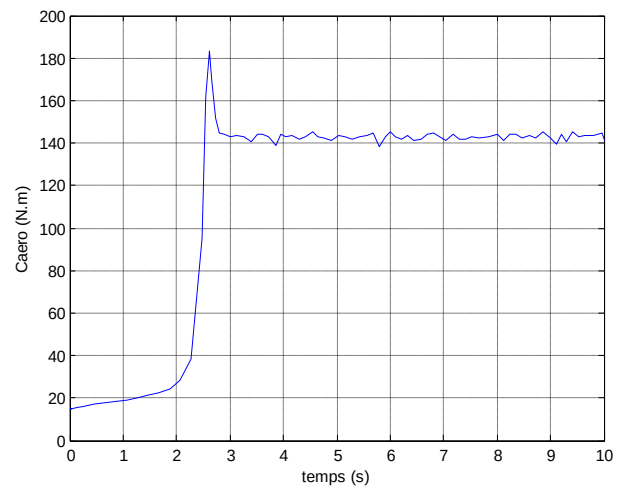
c) Evolution de puissance de la turbine



d) Vitesse de la turbine



e) Evolution de la vitesse spécifique



f) Couple de la turbine

Figure III.35 Résultats de simulation de la turbine.

➤ Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulation de la turbine à vitesse variable on constate :

A travers l'évolution du coefficient de puissance, nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur $C_p=0.45$.

Le coefficient C_p prend toujours une forme d'allure croissante pendant le temps de démarrage, puis il se met à osciller ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient C_p de la turbine.

La vitesse spécifique λ prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur $\lambda= 7.82$ et montre l'influence du profil du vent sur le coefficient λ de la turbine.

La puissance du turbine prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur $P_{aéro}= 4000$ watt.

La courbe de couple prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($C_{aéro}= 143$ N.m) mais on remarque la perturbation que crée le profil du vent sur le couple de la turbine ce qui génère des vibrations indésirables au fonctionnement du système.

La courbe de la vitesse de rotation de la turbine prend toujours une forme croissante pendant le temps de démarrage, puis elle se met à osciller autour de la valeur ($\Omega = 28.2$ rad/sec).

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la partie mécanique d'un système de conversion (l'hélice et le multiplicateur). Cette partie est un élément essentiel dans la conversion éolienne, puisque elle permet l'interconnexion au système de transformation électromécanique « génératrice »

Chapitre IV :

Modélisation et simulation de la MADA

IV.1 Introduction :

Nous avons vu dans le chapitre précédent que pour tirer le maximum de puissance éolienne, la génératrice doit fonctionner à vitesse variable.

A fin de valider notre étude théorique du système de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique sinon la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation du système de conversion globale.

IV.2 Modélisation de la MADA:

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

IV.2.1 Hypothèses :

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [44].

- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f_{mm} est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

IV.2.2 Equations générales de la MADA :

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statorique et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit:

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{IV.1})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{IV.2})$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{IV.3})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{Ou : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

R_r ; R_s : résistances des enroulements rotorique et statoriques .

$$\text{Tel que : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix};$$

l_s ; l_r : Inductances de fuites statorique et rotorique.

M_s ; M_r : Inductances mutuel.

La matrices des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Avec :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$$

En remplaçant les relations (IV.3) et (IV.4) dans, respectivement les relations (IV.1) et (IV.2), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (\text{IV.5})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^T \cdot [I_s]) \quad (\text{IV.6})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((IV.5) et (IV.6)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure IV.36) .

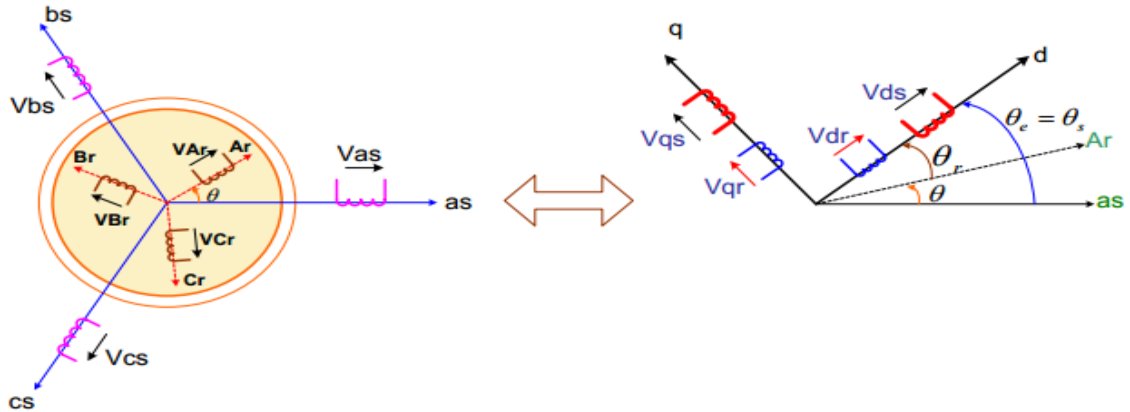


Figure IV.36 Passage de triphasé au biphasé

- d : axe directe stator et rotor.
- q : axe en quadrature stator et rotor.

IV.3 Modèle biphasé de la MADA :

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [45].

Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$[P(\theta_s)] = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

Il est noté par θ_s (resp. par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (Figure IV.37), La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (\text{IV.8})$$

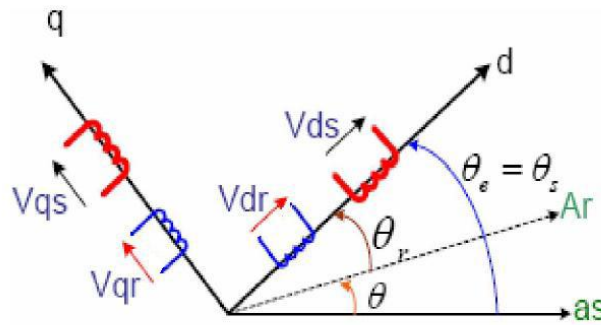


Figure IV.37 Représentation de la machine dans le repère biphasé.

IV.3.1 Equations des tensions :

Appliquons la transformation de Park à l'expression (IV.1) et en multipliant les deux membres de l'égalité par $[P(\theta_s)]$ et en simplifiant, nous trouvons [46] :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_r)] \cdot [V_{r,ABC}] \end{cases} \quad (IV.9)$$

IV.3.2 Equation des courants:

$$\begin{cases} [I_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{s,abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_r)] \cdot [I_{r,ABC}] \end{cases} \quad (IV.10)$$

IV.3.3 Equation des flux :

Appliquons la transformation de Park à l'expression (IV.3) :

$$\begin{cases} [\Phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_{s,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_r)] \cdot [\Phi_{r,ABC}] \end{cases} \quad (IV.11)$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (IV.12)$$

Et :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (IV.13)$$

Tel que :

$$\begin{aligned} L_s &= l_s - M_s : \text{Inductance cyclique statorique} \\ L_r &= l_r - M_r : \text{Inductance cyclique rotorique} \\ L_m &= \frac{3}{2} M_{sr} : \text{Mutuelle cyclique entre rotor-stator.} \end{aligned} \quad (IV.14)$$

IV.4 Choix du référentiel :

IV.4.1 Référentiel lié au stator :

Ce référentiel, appelé souvent stationnaire, est caractérisé par la relation suivante [45] :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (IV.15)$$

Les composantes relatives de la machine dans ce référentiel ont les mêmes caractéristiques que celles du réseau d'alimentation, ce qui convient pour l'étude de la machines dans un réseau complexe. Il est aussi souvent utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation.

IV.4.2 Référentiel lié au rotor :

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante. Il est caractérisé par la relation suivante:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (\text{IV.16})$$

IV.4.3 Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel n'importe aucune simplification aux équations de la machine, il est caractérisé par la relation :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s \quad (\text{IV.17})$$

Les composantes relatives de la machine dans ce référentiel sont constantes ce qui justifie son large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones. Vu l'avantage que importe ce dernier référentiel, nous allons l'utiliser dans la suite de notre étude.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{IV.18})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases}$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} I_{qr} - \Phi_{qs} I_{dr}) \\ C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

IV.5 Stratégie de command de la MADA :

L'avantage de la MADA est de permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine.

Pour avoir un fonctionnement à vitesse de rotation donnée correspondant à une vitesse de vent, il faut que la machine impose un couple résistant permettant ce fonctionnement. Etant donné que la puissance est le produit de la vitesse et du couple il suffit d'avoir une référence de puissance qu'il faut suivre pour fonctionner à vitesse optimale. Ainsi une commande vectorielle de la MADA sera réalisée, celle-ci sera détaillée dans la suite de notre travail.

Pour la machine asynchrone (MAS), le principe d'orientation du flux consiste à orienter le vecteur flux suivant l'un des axes du repère (d, q) , afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit donc de placer le référentiel (d, q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d) . Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante (Figure IV.38).

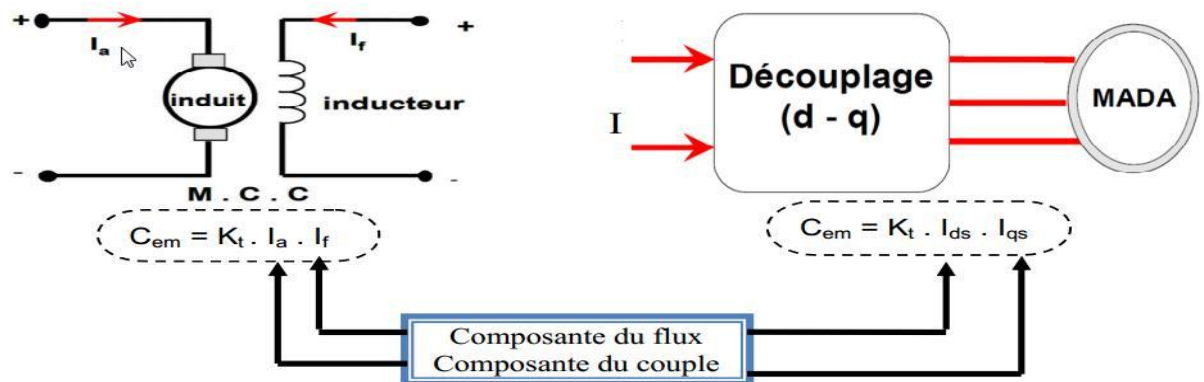


Figure IV.38 Principe de commande découplée pour la machine à CC à excitation séparée et la MADA

Lors de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un référentiel lié au champ tournant, le référentiel $d-q$ et les champs statorique, rotorique et d'entrefer de la machine tournent à la même vitesse. L'orientation de l'un de ces trois champs suivant l'axe d du référentiel constitue le principe de base de la commande par orientation du

flux (commande vectorielle). Cette orientation permet de transformer l'expression du couple électromagnétique à une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

IV.6 Commande vectorielle de la MADA :

Le référentiel biphasé choisi est celui lié au champ tournant. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation. Afin de simplifier la commande de la machine, le vecteur flux statorique Φ_s est aligné avec l'axe « d » du repère biphasé (Figure IV.39), d'où :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \quad (IV.20)$$

$$\Phi_{qs} = 0 \quad (IV.21)$$

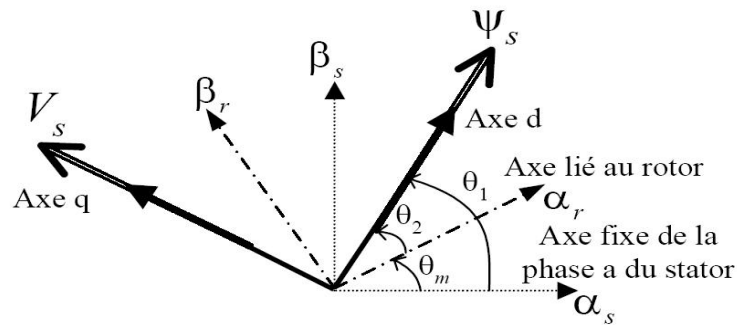


Figure IV.39 vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi

Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine.

L'équation du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{ds} \cdot I_{qr} \quad (IV.22)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux Φ_{ds} devient alors constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

Dans le repère triphasé les tensions statoriques s'expriment par l'expression (IV.1):

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s]$$

R_s Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [47], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (\text{IV.23})$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable [48], [9] les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{IV.24})$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

IV.6.1 Relations entre les courants statoriques et rotoriques :

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (IV.25), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.26})$$

IV.6.2 Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone :

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{IV.27})$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante :

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{IV.28})$$

Ainsi en remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{IV.29})$$

De l'expression (IV.24) nous pouvons écrire :

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{IV.30})$$

D'où d'après (IV.29) :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{IV.31})$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ prés imposée par le réseau.

IV.6.3. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques :

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leur expression, de la façon suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{IV.32})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{IV.33})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{IV.34})$$

IV.7. Simulation et commande :

IV.7.1 Simulation de la commande vectorielle :

Pour vérifier l'efficacité de la méthode de découplage ainsi présentée, nous avons procédé à la simulation numérique de la commande vectorielle directe de la MADA. Pour ces simulations, nous avons supposé, que toutes les variables d'état et de sortie de la machine sont accessibles.

Les simulations présentées dans cette section sont effectuées sur une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée en tension, dont les paramètres sont mentionnés dans l'annexe (A).

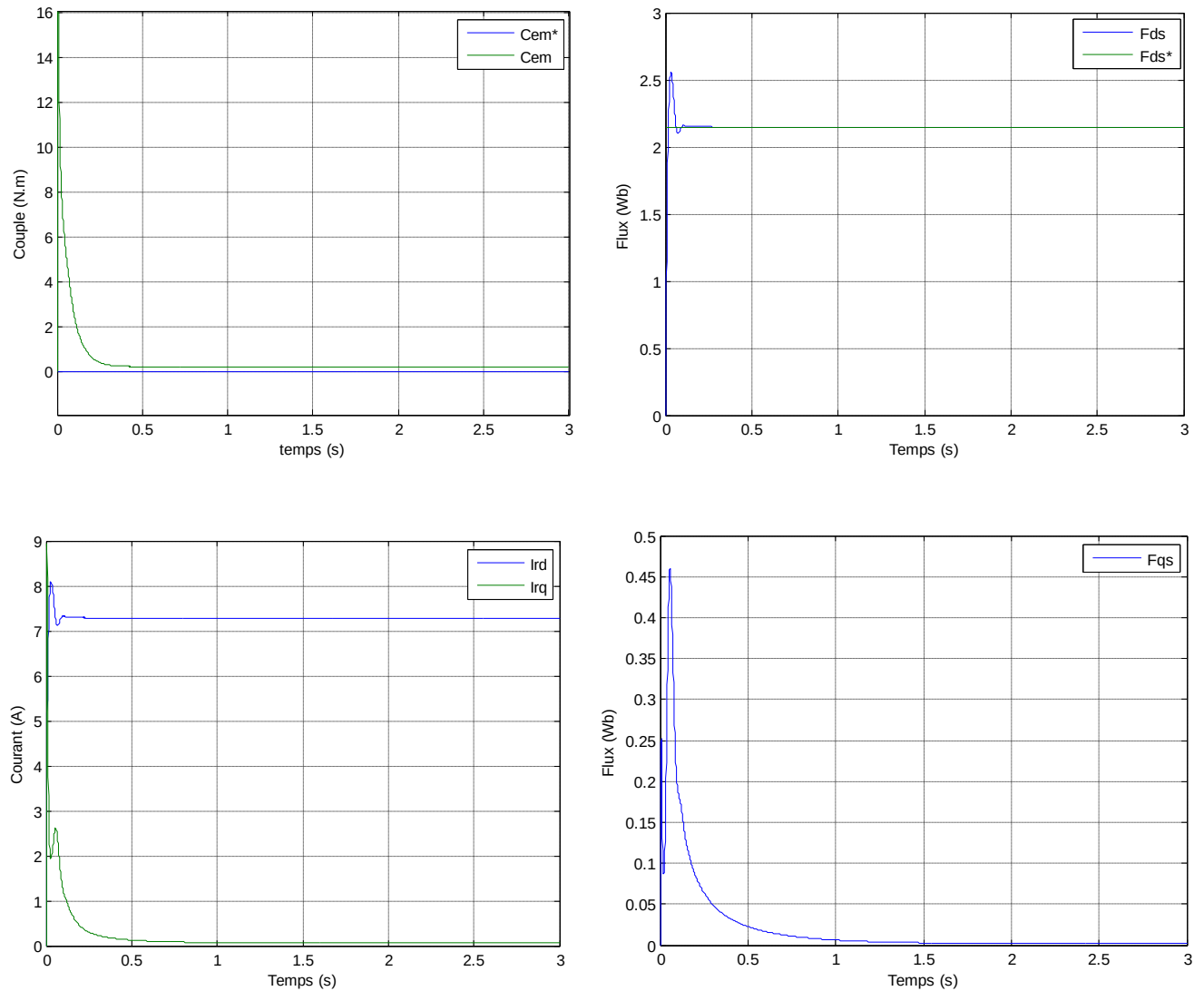


Figure IV.40 Commande vectorielle par la méthode directe.

Afin de montrer la qualité du découplage entre le flux et le couple électromagnétique C_{em} , nous avons illustré, dans la figure (IV.42), les réponses des flux direct et quadratique, le couple C_{em} et les courants. Nous remarquons que le flux est maintenu à sa valeur de référence (valeur nominale). Le couple suit sa valeur de référence, et il reste proportionnel au courant.

IV.7.2 Simulation de la MADA :

IV.7.2.1 Bloc de l'onduleur avec la commande MLI :

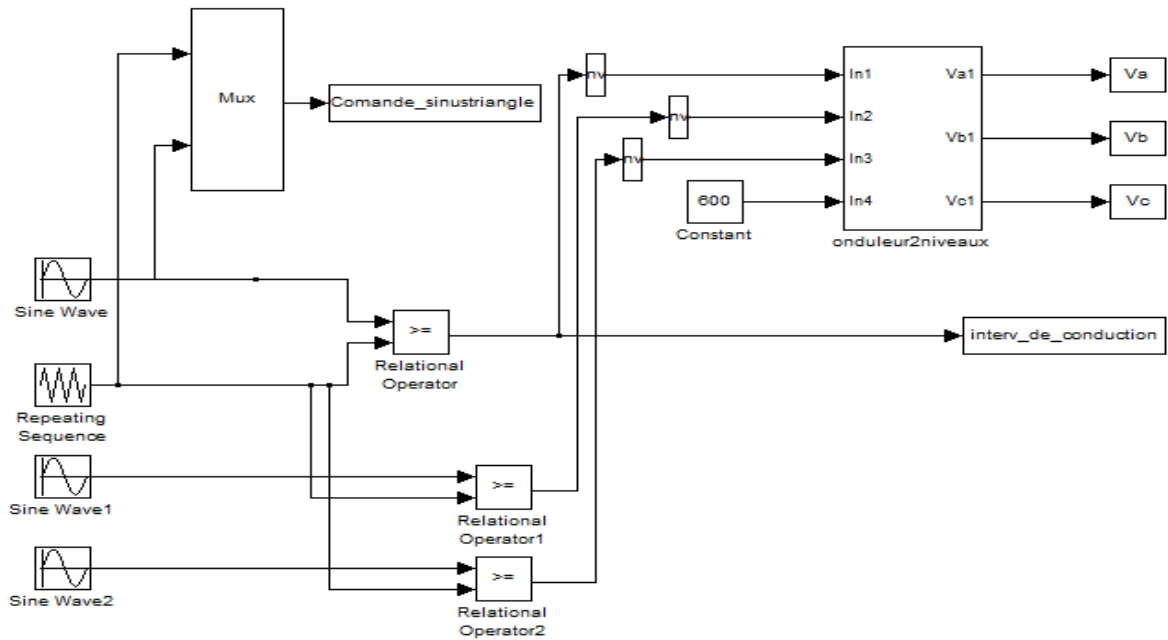
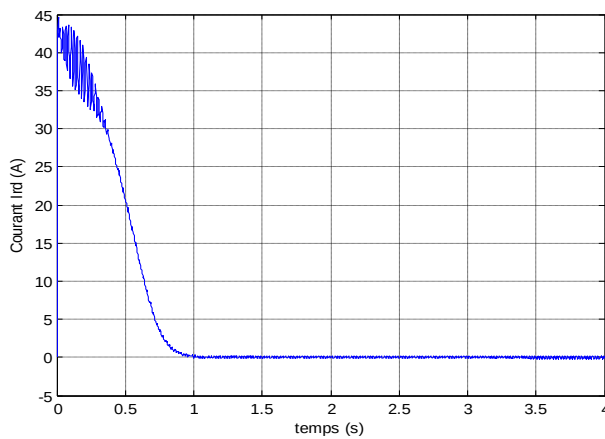
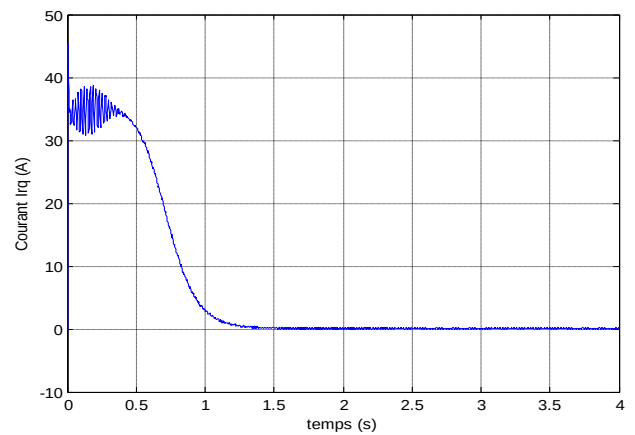


Figure IV.41 : schéma bloc de l'onduleur avec la commande MLI

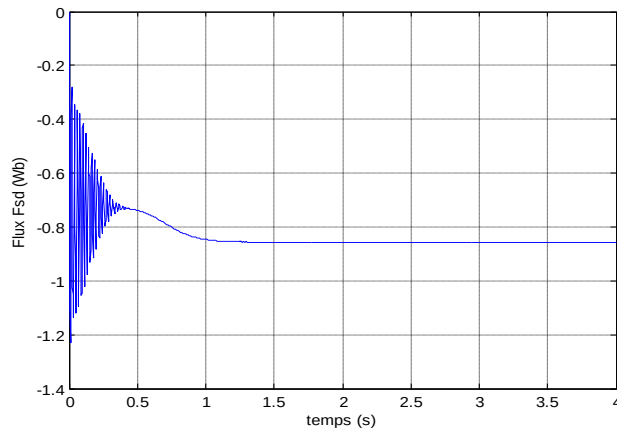
IV.7.2.2 Les résultats de la simulation :



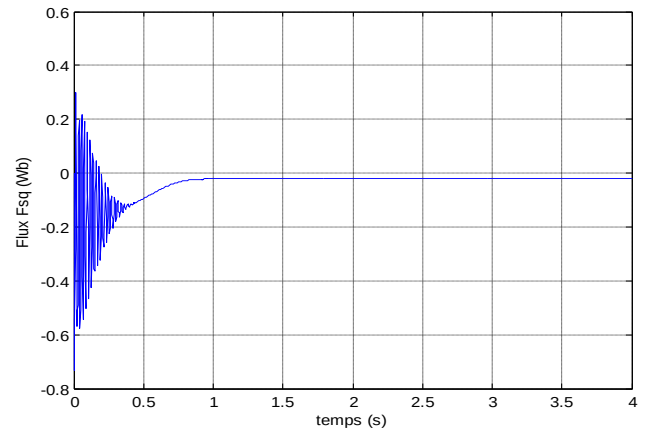
a) Courant rotorique direct



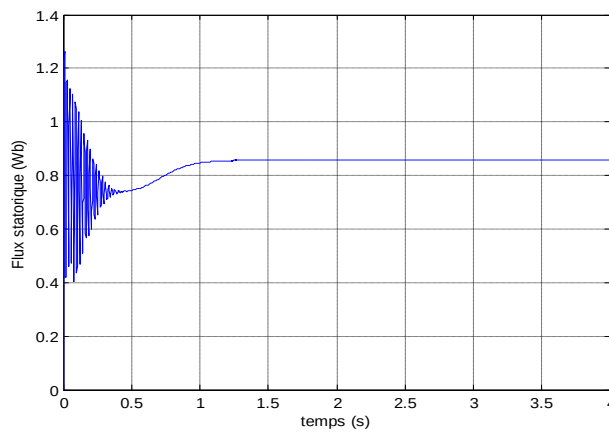
b) Courant rotorique quadrature



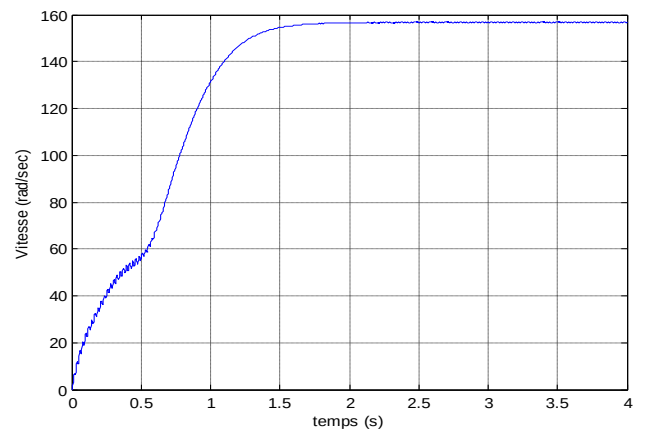
c) Flux statorique direct



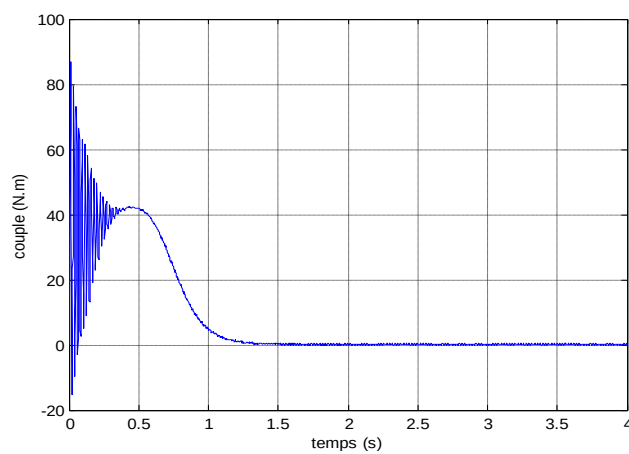
d) Flux statorique quadrature



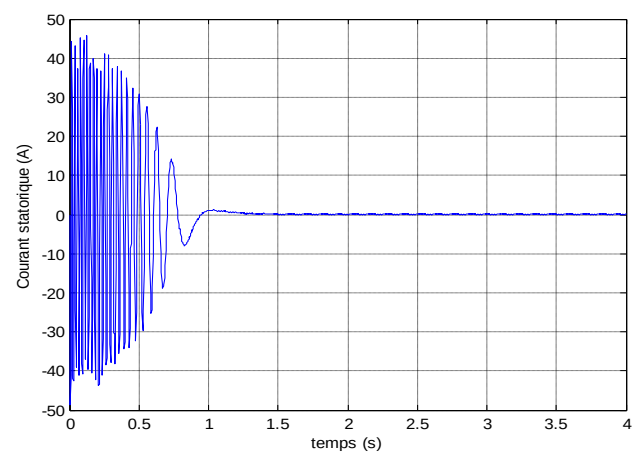
e) Flux statorique



f) Vitesse de rotation



g) Couple électromagnétique



h) Courants statorique

Figure IV.42 résultats de simulation de la MADA sans convertisseur.

➤ **Interprétation des résultats :**

On remarque que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. La vitesse de rotation du rotor atteint une valeur (157 rad/sec) au bout d'un temps égal à 1.6s. Ce démarrage rapide a permis d'avoir un établissement rapide du couple électromagnétique au régime transitoire.

Les courants rotoriques I_{dr} , I_{qr} se stabilisent à des valeurs proches de zéro au bout d'un temps égal respectivement à 0.9s et 1.3s, quant aux flux statorique (Φ_{ds} , Φ_{qs} , Φ_s), ils prennent tous des régimes transitoires oscillatoires et se stabilisent aux valeurs respectivement de - 0.85Wb, -0.02 Wb et 0.85 Wb.

IV.7.3 Simulation de l'association onduleur MADA :

IV.7.3.1 Bloc de l'association Onduleur-MADA :

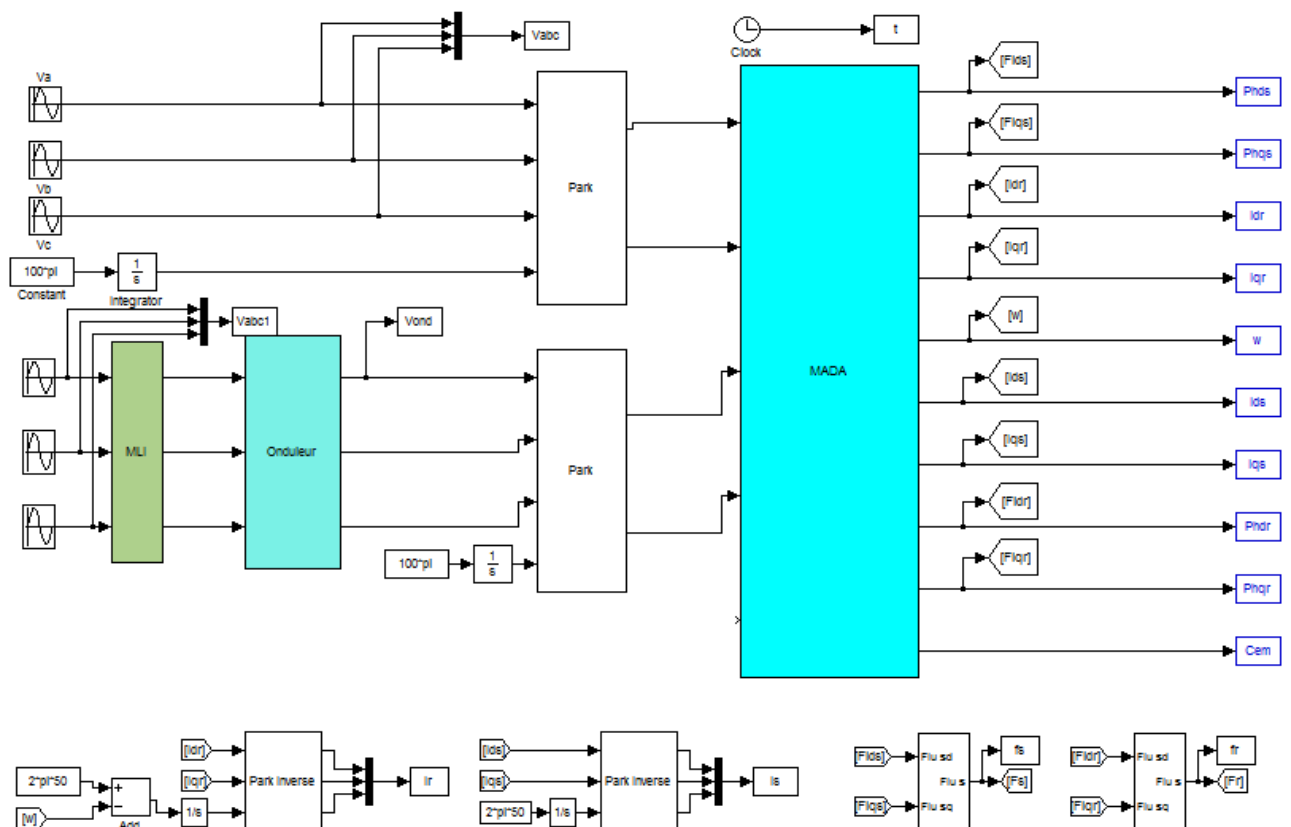
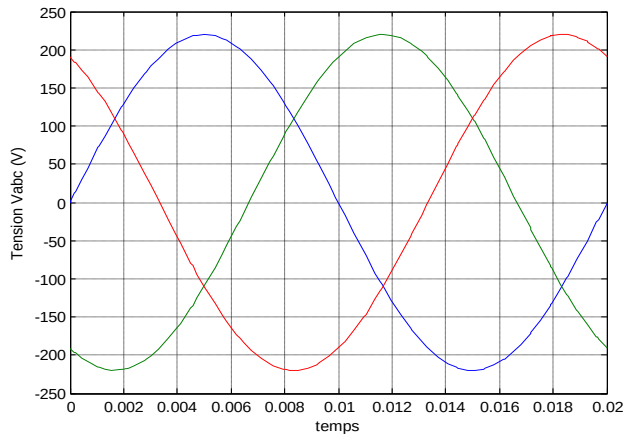


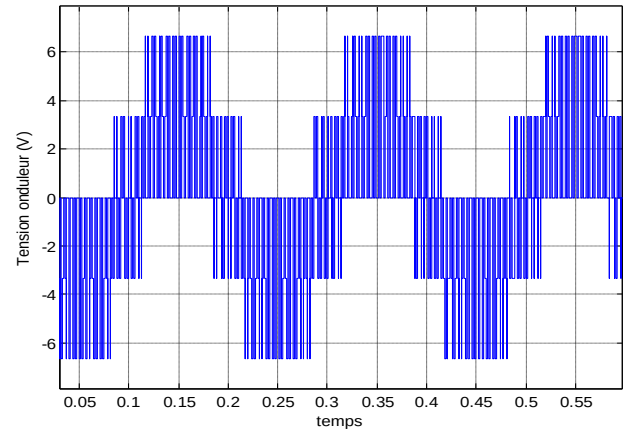
Figure IV.43 : schéma bloc de simulation

IV.7.3.2 Le résultats de simulation :

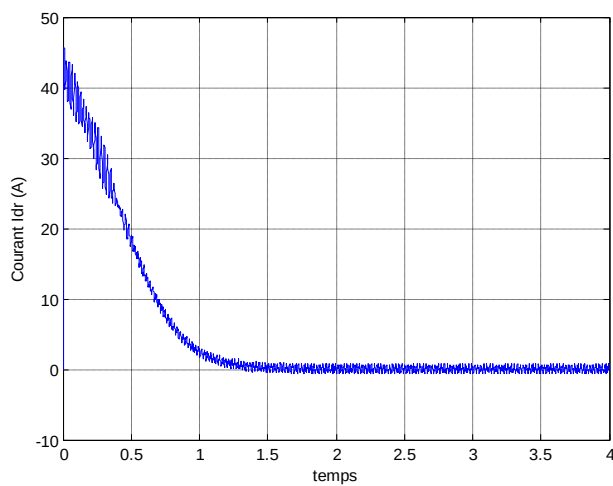
Essai avec : $m = 6$ et $r = 0.8$



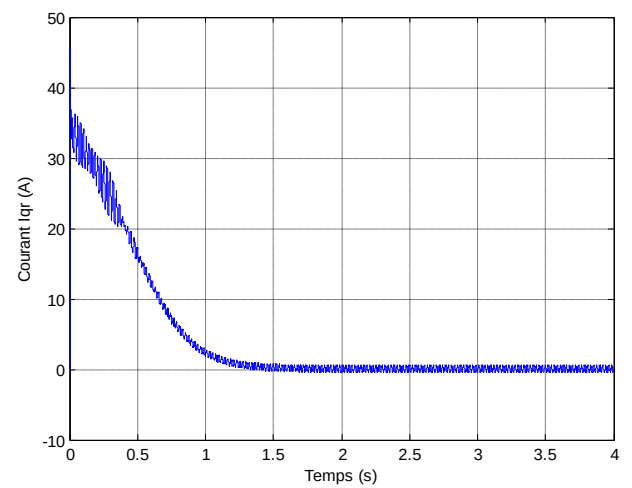
a) Tension statorique



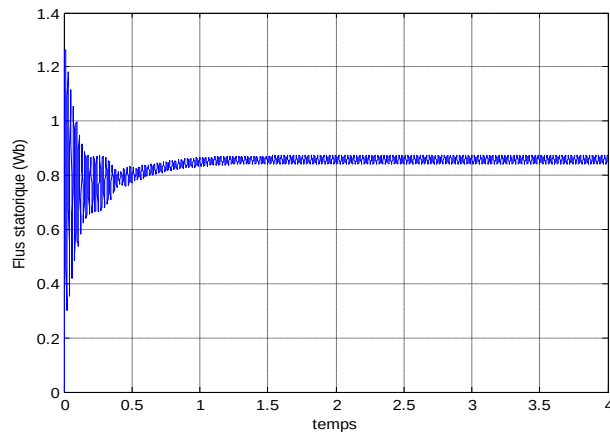
b) Tension de sortie de l'onduleur avec zoom



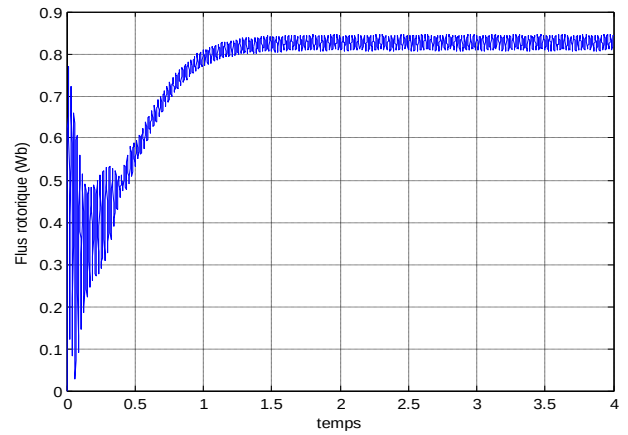
c) Courant rotorique direct



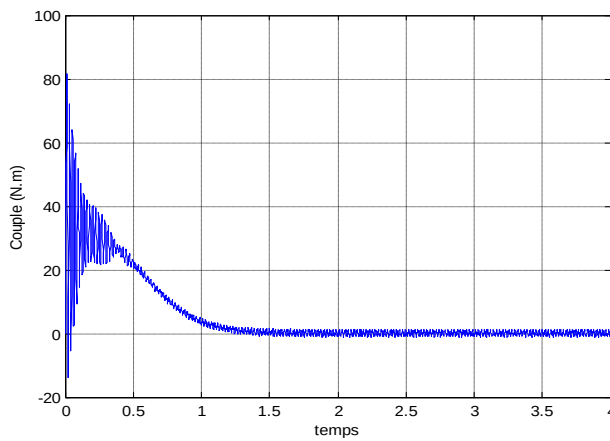
d) Courant rotorique quadrature



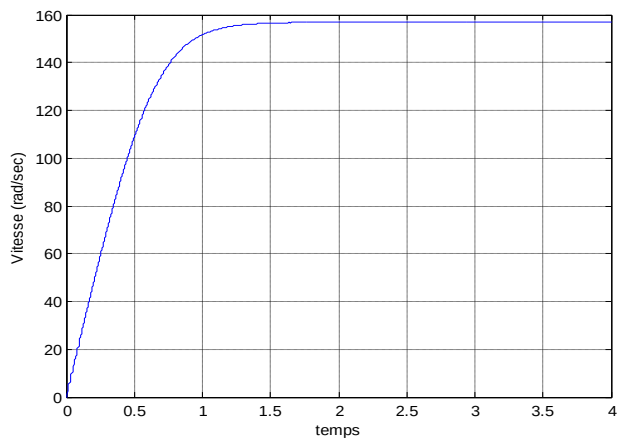
e) Flux statorique



f) Flux rotorique



g) Couple



h) Vitesse

Figure IV.44 résultats de simulation de la MADA avec convertisseur.

L'essai précédent pour $m=6$, les essais pour : $m=24$ et $m=39$; à approximation la même allure, alors on a présenté la réponse d'un seul essai.

➤ Interprétation des résultats :

D'après les caractéristiques des courants statoriques et rotoriques (I_s , I_r), on constate que ces courants passent par une phase transitoire. Puis se stabilisent à une valeur proche de zéro au bout d'un temps égal à (1.2s et 1.3s).

Les flux statorique et rotorique (Φ_s , Φ_r), prennent tous des régimes transitoires oscillatoires et se stabilisent aux valeurs respectivement de 0.85Wb, 0.82Wb.

On constate qu'au démarrage, il y a un accroissement presque linéaire de l'allure de la vitesse, celle-ci tend vers un régime établi après un temps de réponse (1,4 s), puis se stabilise à la valeur (157rad/sec).

A travers l'évolution du couple nous pouvons remarquer le fort couple électromagnétique, au premier instant de démarrage après un temps de réponse (1.2 s), puis il devient stable.

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement en générateur. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite.

Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés.

conclusion générale

conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la Modélisation et simulation d'une turbine éolienne à vitesse variable avec la MADA.

Le premier chapitre rappelle les concepts et principes de base des énergies renouvelables, ainsi que les généralités dans le domaine de l'énergie éolienne, le principe de son travail, ses inconvénients et ses avantages.

Dans un second temps, Les différents composants des éoliennes et leurs types ont été présentés et expliqués , ainsi que différents types de machines électriques pouvant être couplées à des éoliennes, avec différentes classifications et principe de fonctionnement MADA , ses inconvénients et ses avantages.

Dans un dernier temps, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité.

Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier.

Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

- ✓ Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique.
- ✓ Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- ✓ L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.
- ✓ Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques.
- ✓ L'intégration d'un système de stockage inertiel.

ANNEXE (A)

Données de la machine asynchrone à double alimentée et la turbine :

1. Valeurs nominales :

4 kW, 220/380 – 50 Hz, 15/8.6A, 1440 tr/min.

2. Paramètres de la MADA:

- Résistance statorique: $R_s = 1.2 \Omega$.
- Résistance rotorique: $R_r = 1.8 \Omega$.
- Inductance cyclique statorique: $L_s = 0.1554 \text{ H}$.
- Inductance cyclique rotorique: $L_r = 0.1568 \text{ H}$.
- Inductance cyclique mutuelle: $L_m = 0.15 \text{ H}$.
- Le nombre de paires de pôles est: $p = 2$.

3. Constantes mécaniques de la MADA:

- Moment d'inertie : $J_{mach} = 0.2 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

4. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 2.5\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G = 20$.
- Moment d'inertie de la turbine : $J_{turbine} = 315 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement : $f = 0.0024 \text{ N.m.s/rd}$.

Référence

[1] **O. Gergaud**, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, 2002»

[2] https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-d-electricite-en-2016_10537

[3] : <http://lucieroux.com/costelec/photovoltaique.html>

[4] **TOUAL BELKACEM** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice

[5] **B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO C. NICHITA** «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002,

[6] **M. JOURIEH** «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007

[7] **M. BOUDIA Sidi Mohammed**, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie", Mémoire de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd dans 2011

[8] **J. Martin**, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21

[9] **Frédéric Poitiers**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , soutenue le 19/12/2003,

[10] **R. Ramakumar, A. Naeter**, "Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas", Power Engineering Society General Meeting IEEE, 6-12 June 2004, Vol.2, PP. 2103 – 2105.

[11] Technique de l'ingénieur BM 4640.

[12] **H. Camblong**, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable", Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.

[13] **L. Chang**, "Systèmes de conversion de l'énergie éolienne", IEEE Canadian Review, Summer/Eté 2002, PP. 1-5.

[14] **B. Multon, G. robin, M. Ruellan et H. Ben Ahmed**, " Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire : Perspectives offertes par les ressources renouvelables", Revue 3EI, no36 Mars 2004, pp. 1-14.

[15] **Krishna Vasudevan and P.Sasidhara Rao** « A Modular Approach to the Simulation of Doubly –fed Induction Machine Systems » Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology Mdras 600036, INDIA

[16] **P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi**, « Eoliennes» , techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21.

[17] **MENY IVAN**, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance» laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM), soutenue le 14/12/2004.

[18] Site Internet de l'Association Danoise de l'industrie éolienne,
<http://www.windpower.org/fr/core.htm>.

[19] **Haritza camblong** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers , soutenue le 18 /12/2003.

[20] **Salama et Aïmani**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL),

[21] **Paul Gipe**, collaborateur régulier des revues Independent Energy et Windstats. Et l'auteur des ouvrages Wind Power for Home & Busines et Wind energy comes of age. «À l'étape de la maturité : L'énergie éolienne », <http://WWW.ilr.Tu.berlin.de/WKA/aletape.html>

[22] **Adam MIRECKI**, « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse,

[23] **H.S.vicactors , J.A Tegopoulos , Fellon** .IEEE « Stady state Analysis of A Doubly. FED induction generator under synchronous operation» national Technical University of Athens,

Département of electrical engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol .4, NO.3, September 1989.

[24] Milutin G. Jovanovic* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines »University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191-2273016, Fax: +44-191-2273684 ,EMail: milutin.jovanovic@unn.ac.uk University of Newcastle, NSW 2308, Australia

[25] S. DRID, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : théorie et expérimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.

[26]AKKARI.N ; « Contribution a l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation » ; thèse de doctorat. Université de Batna, Algérie 2010

[27] SALLOUM G, " Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation", Thèse de doctorat, I.N.P de Toulouse 2007, France.

[28] P-E. VIDAL, «Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation», Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004 comparison », European Conference on Power. Electronics And Applications (EPE), Gras,2001.

[29] B. Hopfenspeger et D.J.Atkinson, « Doubly-fed a.c. machines: classification and comparison », European Conference on Power. Electronics And Applications (EPE), Gras,2001.

[30] A. Dendouga, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone a double alimentation (DFIM) », Thèse De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.

[31] A. Meroufel, « Contrôle De La Machine Asynchrone ». Polycopie De Cours, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2009.

[32] **DENDOUGA. A**, « contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.

[33] **S. Khojet El Khil, I. Slama-Belkhodja, M. Pietrzak-David et B. De Fornel**, « Sensorless field oriented control of doubly fed induction speed drive », IEEE, The International Conference on “Computer as a Tool”, pp: 9-12, 2007.

[35] **Y. Bekakra et D. Ben Attous**, « A Sliding Mode speed and flux control of a doubly fed induction machine », IEEE, pp: 174 - 178, 2009.

[36] **P. Lopez et A. S. Nouri**, « Théorie Elémentaire Et Pratique De La Commande Par Les Régimes Glissants », Springer, 2006.

[37] **M. BOUDIA Sidi Mohammed**, “Optimisation de l’Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l’Atlas des Vents en Algérie”, Mémoire de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd dans 2011

[38]. **Bouaraki Mouloud**, « Etude d’un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magistère, Université M’hamed bougara-boumerdes, 2012.

[39] **Adam MIRECKI**, « étude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l’institut national polytechnique de Toulouse,

[40] **L. Xu & W. Cheng** “ Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless schem “, IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636{642, mai/juin 1995.

[41] **S. Elaimani** «Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», Thèse de doctorat à l’école centrale de Lille et l’université des sciences et de la technologie de Lille, 2004

[42] **Karim Belmokhtar**, Mamadou Lamine Doumbia « Modélisation et commande d’un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique » Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE’10, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie,IEEE

[43] **P. Berlu**, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.

[44] **HAMZAOUI Ihssen** : « *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur* » Ingénieur en électrotechnique ENP 2008.

[45] **METATLA Samir** : « *Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA* » Ingénieur en Électrotechnique ENP 2009.

[46] **ABBAS Mourad** : « *modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux application à l'énergie éolienne* » Ingénieur en Electrotechnique ENP 2006.

[47] **Yacine Abderrahmane BENCHERIF** : « *Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne* » Ingénieur en Electrotechnique ENP 2008.

[49] **A .BOYETTE** : « *Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* » thèse de doctorat 11 décembre 2006 Université Henri Nancy 1.

Résumé

L'énergie éolienne est une source adorable efficace et abondante d'électricité . le développement de la technologie éolienne à vitesse variable et à fréquence constante est devenu un domaine d'intérêt majeur .

Ce travail présente la modélisation et la simulation de la turbine éolienne à vitesse variable avec MADA , pour ce faire , un modèle a été établi pour chaque composant (Turbine , MADA , redresseur-onduleur) avec commande vectorielle à flux statorique orienté .

Cette étude a été conclue par la simulation de l'ensemble de l'éolienne. Nous avons pu ainsi constater la capacité de la MADA à intégrer ce genre d'application.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation (MADA) , éolienne, vitesse variable, modélisation , onduleur, redresseur, commande vectorielle.

Abstract

Wind energy is an efficient source of electricity .The development of variable speed constant frequency wind turbine technology has become an area of major interest .

This work presents the modeling and simulation of the variable speed wind turbine with MADA to do this , a model has been established for each component of the wind turbine (Turbine ; MADA , rectifier-inverter) with direct stator oriented vectorial control .

This study was concluded by a simulation of the wind generator. We observed as a result, that the DFIM is able to be used in the wind generation application.

Keywords: Doubly fed induction machine (DFIM), wind turbine, modeling , inverter, converter, vector control.

ملخص

طاقة الرياح هي مصدر فعال للكهرباء، أصبح تطوير السرعة المتغيرة وتكنولوجيا التوربينات الهوائية ذات التردد الثابت مجالاً مهماً للغاية .

يقدم هذا العمل نمذجة ومحاكاة التوربينات الهوائية المتغيرة السرعة مع مادا ، للقيام بذلك ، تم إنشاء نموذج لكل مكون من توربينات الرياح (التوربينات ، مادا ، العاكس ، المعدل) باستعمال التحكم الشعاعي بتدفق الساكن الموجه .

اختتمت هذه الدراسة بمحاكاة المولد الهوائي ، واستخلصنا من ذلك أن الماكينة اللائزمانية ثنائية التغذية لها قدرة جيدة على العمل في التطبيق السالف الذكر.

الكلمات المفتاحية: الآلة اللائزمانية ثنائية التغذية ، مولد الهوائي ، متغيرة ، السرعة تنميط،موج ،مقوم ،تحكم شعاعي.